



TUGAS AKHIR - TM 145502

**ANALISA UNJUK KERJA DAN TINGKAT KAVITASI
PADA TURBIN FRANCIS
DI PT PJB UNIT PEMBANGKITAN BRANTAS
UNIT PLTA SUTAMI**

MOH. ZAENAL ARIFIN
NRP. 2114 030 087

Dosen Pembimbing
Dedy Zulhidayat Noor, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19751206 200501 1 002

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN INDUSTRI
FAKULTAS VOKASI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017



TUGAS AKHIR - TM 145502

**ANALISA UNJUK KERJA DAN TINGKAT KAVITASI
PADA TURBIN FRANCIS
DI PT PJB UNIT PEMBANGKITAN BRANTAS
UNIT PLTA SUTAMI**

MOH. ZAENAL ARIFIN
NRP. 2114 030 087

Dosen Pembimbing
Dedy Zulhidayat Noor, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19751206 200501 1 002

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN INDUSTRI
FAKULTAS VOKASI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017



FINAL PROJECT - TM 145502

**WORK PERFORMANCE ANALYSIS AND LEVEL OF
CAVITATION IN FRANCIS TURBINE
IN PT PJB UNIT PEMBANGKITAN BRANTAS
UNIT PLTA SUTAMI**

MOH. ZAENAL ARIFIN
NRP. 2114 030 087

Advisor
Dedy Zulhidayat Noor, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19751206 200501 1 002

INDUSTRIAL MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF VOCATION
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2017

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISA UNJUK KERJA DAN TINGKAT KAVITASI PADA TURBIN FRANCIS DI PT PJB UNIT PEMBANGKITAN BRANTAS UNIT PLTA SUTAMI

TUGAS AKHIR


Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Ahli Madya
pada
Bidang Studi Konversi Energi
Departemen Teknik Mesin Industri
Fakultas Vokasi
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya

Oleh:

MOH. ZAENAL ARIFIN
NRP. 2114 030 087

Mengetahui dan Menyetujui:

Dosen Pembimbing



Dedy Zuhdiawati Noor, S.T., M.T., Ph.D.
NIP 19751206 200501 1 002

SURABAYA
JULI 2017

Halaman ini sengaja dikosongkan

**ANALISA UNJUK KERJA DAN TINGKAT
KAVITASI PADA TURBIN FRANCIS
DI PT PJB UNIT PEMBANGKITAN BRANTAS
UNIT PLTA SUTAMI**

Nama Mahasiswa : Moh. Zaenal Arifin
NRP : 2114 030 087
Jurusan : Departemen Teknik Mesin
Industri FV-ITS
Dosen Pembimbing : Dedy Zulhidayat Noor, S.T., M.T.,
Ph.D.

Abstrak

Turbin Francis merupakan jenis turbin air yang bekerja dengan memakai proses tekanan lebih. Saat ini turbin Francis adalah yang paling banyak dipakai, karena tinggi air jatuh dan kapasitasnya yang paling sering terdapat/sesuai dengan kebutuhannya. Turbin Francis yang dijadikan Tugas Akhir ini terdapat di PLTA Sutami, PJB UP Brantas Karangates, Malang yang bekerja dengan tinggi air jatuh antara 100 m-300 m dan dengan kecepatan spesifik antara 100 rpm-200 rpm. Turbin memiliki unjuk kerja yang bisa saja naik dan bisa turun. Faktor-faktor yang memengaruhi unjuk kerja dalam turbin ini, yaitu debit air, head efektif, daya hidrolik, efisiensi turbin, kecepatan spesifik dan koefisien kavitasi.

Dari hasil perhitungan dan analisa pada turbin Francis ini, didapatkan head efektif tertinggi sebesar 96,10043868 m, daya hidrolik tertinggi sebesar 29034,88821 kW, efisiensi turbin tertinggi sebesar 82,86866649%, kecepatan spesifik tertinggi sebesar 142,02335 rpm, dan koefisien kavitasi terendah sebesar 0,159510198. Sehingga batasan pengoperasian pada turbin Francis agar mencapai efisiensi maksimum dapat diketahui.

Kata kunci: turbin Francis, unjuk kerja, koefisien kavitasi

**WORK PERFORMANCE ANALYSIS AND LEVEL
OF CAVITATION IN FRANCIS TURBINE
IN PT PJB UNIT PEMBANGKITAN BRANTAS
UNIT PLTA SUTAMI**

Name : Moh. Zaenal Arifin
NRP : 2114 030 087
Department : Department of Mechanical Engineering
Industry FV-ITS
Advisor : Dedy Zulhidayat Noor, S.T., M.T., Ph.D.

Abstract

The Francis turbine is a type of water turbine that works using more pressure processes. Francis turbine are currently the most widely used, due to the falling water levels and their most frequent capacities/according to their needs. The Francis turbine used as Final Project is located at Sutami Hydro Power Plant, PJB UP Brantas Karangates, Malang which works with high water fall between 100 m-300 m and with specific speed between 100 rpm-200 rpm. The turbine has a performance that could be up and down. Factors influence performance in this turbine are water discharge, effective head, hydraulic power, turbine efficiency, specific speed and cavitation coefficient.

From the calculation and analysis on this Francis turbine, it is obtained the highest effective head is 96.10043868 m, the highest hydraulic power is 29034.88821 kW, the highest turbine efficiency is 82.86866649%, the highest specific speed is 142.02335 rpm, and the lowest cavitation coefficient is 0.159510198. So, the operational limits on the Francis turbine to achieve maximum efficiency can be known.

Keywords: Francis turbine, performance, cavitation coefficient

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah *Subhanahu wa Ta'ala* yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan Tugas Akhir ini yang berjudul:

ANALISA UNJUK KERJA DAN TINGKAT KAVITASI PADA TURBIN FRANCIS DI PT PJB UNIT PEMBANGKITAN BRANTAS UNIT PLTA SUTAMI

Penyelesaian Tugas Akhir ini merupakan syarat kelulusan akademis dan memperoleh gelar Ahli Madya dalam menempuh pendidikan Bidang Studi Konversi Energi di Departemen Teknik Mesin Industri, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Terlaksana dan tersusunnya Tugas Akhir ini tidak terlepas dari dukungan, bantuan dan kerjasama yang baik dari semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung terlibat di dalam Tugas Akhir ini. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Heru Mirmanto, M.T. selaku Kepala Departemen Teknik Mesin Industri FV-ITS dan dosen pengajar mata kuliah Turbin yang telah memberi arahan, masukan dan bimbingan selama ini.
2. Bapak Ir. Suhariyanto, M.T. selaku Ketua Program Studi D3 Teknik Mesin Industri FV-ITS dan Koordinator Tugas Akhir yang telah memberikan arahan dan bimbingan selama ini.
3. Bapak Dedy Zulhidayat Noor, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir ini yang telah memberikan ilmu, arahan, masukan, bimbingan dan bantuan sehingga penulis dapat mengerjakan dan menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing., Ph.D. selaku dosen wali yang telah memberikan ilmu, arahan, bimbingan dan bantuan selama tiga tahun masa perkuliahan berlangsung.

5. Bapak/Ibu Dosen dan seluruh karyawan Departemen Teknik Mesin Industri FV-ITS yang telah banyak membimbing dan membantu selama perkuliahan.
6. PT PJB Unit Pembangkitan Brantas khususnya kepada Bu Tri, Mbak Adel, Pak Bambang Wahyu Jatmiko, Mas Gama dan Mas Fajar serta karyawan lainnya.
7. Orang tua penulis, yaitu Bapak Roso Wiyono, Bu Sun Rofi'ah (Almarhumah) dan Bu Priani. Adik penulis, yaitu Afiqa Dwi Maharani. Serta seluruh keluarga. Terima kasih atas dukungan baik moril maupun materil serta doanya yang senantiasa diberikan selama ini.
8. Saudara-saudara sebimbingan Tugas Akhir, yakni Hermawan, Nafi', Izzul, Risco, Ryan dan Fahri.
9. Saudara-saudara angkatan 2014 Departemen Teknik Mesin Industri FV-ITS, rekan-rekan Tim Mobil Basudewo Etanol dan seluruh mahasiswa Departemen Teknik Mesin Industri FV-ITS. Terima kasih atas bantuan, kerjasama dan kebersamaannya selama ini. Semoga sukses untuk kita semua.

Penulis menyadari bahwa Laporan Tugas Akhir ini masih begitu banyak kekurangannya. Oleh karena itu, kritik dan saran sangat diharapkan demi kesempurnaan Tugas Akhir ini. Akhir kata, penulis berharap semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang membacanya.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL INDONESIA	i
HALAMAN JUDUL INGGRIS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK INDONESIA	v
ABSTRAK INGGRIS	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Permasalahan	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Metode Penulisan	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.7 Manfaat	4
BAB II DASAR TEORI	5
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Air	5
2.1.1 Prinsip Pembangkit Listrik Tenaga Air	5
2.1.2 Perubahan Energi di PLTA	6
2.2 Turbin Air	8
2.2.1 Pengertian Turbin Air	8
2.2.2 Klasifikasi Turbin Air	8
2.2.2.1 Berdasarkan Prinsip Kerjanya	8
2.2.2.2 Berdasarkan Daerah Operasi Turbin	14
2.2.2.3 Berdasarkan Kecepatan Spesifik	15
2.2.2.4 Berdasarkan Putaran Nominal dan <i>Run-away</i> <i>Speed</i> Turbin	15
2.2.3 Turbin yang Digunakan untuk Tugas Akhir ini (Turbin Francis)	16
2.2.3.1 Pengertian Turbin Francis	16
2.2.3.2 Bagian-bagian Turbin Francis	16

2.2.3.3 Prinsip Kerja Turbin Francis	19
2.2.4 Kavitasi	20
2.2.4.1 Pengertian Kavitasi.....	20
2.2.4.2 Akibat Kavitasi.....	21
2.2.4.3 Daerah Rawan Kavitasi	22
2.2.4.4 Pencegahan Kavitasi.....	23
2.2.4.5 Koefisien Kavitasi	23
2.2.5 Peralatan Utama PLTA Sutami dan Turbin Francis	
PLTA Sutami	26
2.2.5.1 Bendungan.....	26
2.2.5.2 Waduk.....	27
2.2.5.3 <i>Spillway</i> (Saluran Pelimpah)	28
2.2.5.4 Pintu–Pintu Air	29
2.2.5.5 <i>Surge Tank</i>	30
2.2.5.6 Pipa Pesat (<i>Penstock</i>).....	31
2.2.5.7 Turbin	32
2.2.5.8 Inlet Valve	34
2.2.5.9 Generator	35
2.2.5.10 Penguat Medan (<i>Exciter</i>)	37
2.2.5.11 <i>Guide Vane</i>	38
2.2.5.12 Governor.....	39
2.3 Persamaan yang Mendukung Penelitian	41
2.3.1 Persamaan Bernouli	41
2.3.2 Persamaan Head Efektif.....	43
2.3.3 Persamaan Daya Hidrolik	44
2.3.4 Persamaan Daya Turbin	44
2.3.5 Persamaan Efisiensi Turbin	45
2.3.6 Persamaan Kecepatan Spesifik	45
2.3.7 Persamaan Koefisien Kavitasi	46
BAB III METODOLOGI	47
3.1 Metodologi.....	47
3.2 <i>Flowchart</i>	48
BAB IV PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN	51
4.1 Data yang Diperoleh dan Contoh Perhitungan Turbin Unit 2 pada Daya Generator 20 kW	51

4.1.1 Head Efektif.....	51
4.1.2 Daya Hidrolik	53
4.1.3 Daya Turbin.....	54
4.1.4 Efisiensi Turbin	54
4.1.5 Kecepatan Spesifik	55
4.1.6 Koefisien Kavitasi	55
4.2 Data Hasil Perhitungan dan Analisa	56
4.2.1 Perbandingan Head Efektif Fungsi Debit.....	56
4.2.2 Perbandingan Daya Hidrolik Fungsi Debit	58
4.2.3 Perbandingan Efisiensi Turbin Fungsi Debit..	59
4.2.4 Perbandingan Koefisien Kavitasi Fungsi Debit	61
4.2.5 Perbandingan Koefisien Kavitasi Fungsi Kecepatan Spesifik	63
BAB V PENUTUP	67
5.1 Kesimpulan	67
5.2 Saran	68
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	
BIODATA PENULIS	

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Instalasi Turbin Air	8
Gambar 2.2 Turbin Pelton	9
Gambar 2.3 Turbin Michell-Banki	10
Gambar 2.4 (a) Kincir Air <i>Overshot</i> , (b) Kincir Air <i>Under-shot</i> , (c) Kincir Air <i>Breast-shot</i>	12
Gambar 2.5 Turbin Francis.....	13
Gambar 2.6 Turbin Kaplan	14
Gambar 2.7 Skema Instalasi Turbin Francis.....	16
Gambar 2.8 <i>Runner</i>	17
Gambar 2.9 <i>Casing</i>	17
Gambar 2.10 <i>Guide Vane</i>	18
Gambar 2.11 <i>Pipa Inlet</i>	18
Gambar 2.12 <i>Draft Tube</i>	19
Gambar 2.13 Jalannya Tekanan dan Kecepatan Air di Dalam Suatu Turbin Tekanan Lebih	20
Gambar 2.14 Contoh Kerusakan Material Akibat Kavitasi	21
Gambar 2.15 Daerah Rawan Kavitasi.....	22
Gambar 2.16 Batas Terendah dari Sigma Instalasi untuk Menetapkan Letak Turbin	24
Gambar 2.17 Nilai H_s dan Posisi Turbin terhadap Permukaan Air Bawah.....	25
Gambar 2.18 Waduk PLTA Sutami.....	27
Gambar 2.19 <i>Spill Way</i> PLTA Sutami.....	28
Gambar 2.20 <i>Tail Race</i> PLTA Sutami.....	30
Gambar 2.21 <i>Surge Tank</i> PLTA Sutami	31
Gambar 2.22 <i>Penstock</i> PLTA Sutami.....	32
Gambar 2.23 Turbin PLTA Sutami	33
Gambar 2.24 Struktur Turbin PLTA Sutami	34
Gambar 2.25 <i>Inlet Valve</i> PLTA Sutami	35
Gambar 2.26 Generator PLTA Sutami	37
Gambar 2.27 <i>Exciter</i> PLTA Sutami.....	38
Gambar 2.28 <i>Guide Vane</i> PLTA Sutami	38
Gambar 2.29 Governor PLTA Sutami	41

Gambar 2.30 <i>Energy Balance</i>	41
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i>	48
Gambar 4.1 Skema Elevasi z_1 dan z_2	52
Gambar 4.2 Grafik Perbandingan Head Efektif Fungsi Debit ..	57
Gambar 4.3 Grafik Perbandingan Daya Hidrolik Fungsi Debit.	59
Gambar 4.4 Perbandingan Efisiensi Turbin Fungsi Debit	60
Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Koefisien Kavitas Fungsi Debit	62
Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Koefisien Kavitas Fungsi Kecepatan Spesifik	64

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Klasifikasi Turbin Air Berdasarkan Daerah Operasi Turbin	14
Tabel 2.2 Klasifikasi Turbin Air Berdasarkan Kecepatan Spesifik	15
Tabel 2.3 Klasifikasi Turbin Berdasarkan Putaran Nominal dan <i>Run-away Speed</i> Turbin	15
Tabel 2.4 Data Bendungan PLTA Sutami	26
Tabel 2.5 Data Teknik Waduk PLTA Sutami.....	27
Tabel 2.6 Data Teknik <i>Spill Way</i> PLTA Sutami.....	28
Tabel 2.7 Data Teknik Terowongan <i>Head Race</i> PLTA Sutami ..	29
Tabel 2.8 Data Teknik <i>Intake Gate</i> PLTA Sutami	29
Tabel 2.9 Data Teknik <i>Intake Trash Rack</i> PLTA Sutami	29
Tabel 2.10 Data Teknik <i>Tail Race</i> PLTA Sutami.....	30
Tabel 2.11 Data Teknik <i>Surge Tank</i> PLTA Sutami.....	31
Tabel 2.12 Data Teknik Pipa Pesat (<i>Penstock</i>) PLTA Sutami..	32
Tabel 2.13 Data Teknik Turbin PLTA Sutami	33
Tabel 2.14 Data Teknik <i>Inlet Valve</i> PLTA Sutami.....	34
Tabel 2.15 Data Teknik Generator PLTA Sutami	36
Tabel 2.16 Data Teknik <i>Exciter</i> PLTA Sutami.....	37
Tabel 2.17 Data Teknik Governor PLTA Sutami	40
Tabel 4.1 Data Hasil Observasi di PLTA Sutami	51
Tabel 4.2 Data Konversi Satuan	52
Tabel 4.3 Data untuk Perhitungan Daya Hidrolik	53
Tabel 4.4 Data untuk Perhitungan Daya Turbin	54
Tabel 4.5 Data untuk Perhitungan Efisiensi Turbin	54
Tabel 4.6 Data untuk Perhitungan Kecepatan Spesifik	55
Tabel 4.7 Data untuk Perhitungan Koefisien Kavitasitas	55
Tabel 4.8 Data Perbandingan Head Efektif Fungsi Debit	56
Tabel 4.9 Data Perbandingan Daya Hidrolik Fungsi Debit	58
Tabel 4.10 Data Perbandingan Efisiensi Turbin Fungsi Debit ..	59
Tabel 4.11 Data Perbandingan Koefisien Kavitasitas Fungsi Debit ..	61
Tabel 4.12 Data Perbandingan Koefisien Kavitasitas Fungsi Kecepatan Spesifik	63

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi merupakan kebutuhan yang tidak pernah bisa dipisahkan dari kehidupan manusia di bumi ini. Yang mana energi adalah kekuatan untuk manusia agar mereka bisa bertahan hidup. Salah satu energi yang berguna dan penting bagi manusia adalah energi listrik. Dengan energi listrik manusia bisa melakukan hal yang menunjang kehidupan mereka, misalnya penerangan, sumber energi pada kendaraan, industri dan sebagainya. Bisa dikatakan saat ini energi listrik merupakan kebutuhan pokok manusia dikarenakan kegunaannya yang sudah sangat mendasar. Misalnya, inkubator bayi yang mana memerlukan energi listrik untuk pengoperasiannya, industri elektronik yang bergantung pada energi listrik, industri IT (*Information and Technology*) dan sejenisnya.

Seperti yang diketahui saat ini bahwa kebutuhan energi listrik Indonesia lebih besar dibandingkan dengan ketersediaan energi listrik. Hal ini dikarenakan beberapa faktor, antara lain:

- a. Meningkatnya populasi penduduk Indonesia
- b. Semakin banyaknya peralatan yang membutuhkan energi listrik
- c. Menurunnya sumber energi listrik

Oleh karena itu, diperlukan pengadaan sumber energi listrik secara besar-besaran agar ketersediaan energi listrik bisa sebanding dengan kebutuhan energi listrik. Akan lebih baik jika ketersediaan energi listrik bisa lebih besar dari kebutuhan energi listrik sehingga memiliki cadangan energi. Hal ini sejalan dengan Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia tentang Pengesahan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT Perusahaan Listrik Negara (PERSERO) tahun 2016 s/d 2025 mengenai percepatan pembangunan infrastruktur ketenagalistrikan termasuk program pembangunan pembangkit 35.000 MW dan jaringan transmisi sepanjang 46.000 km.

Melihat kondisi geografis Indonesia, yang mana banyak terdapat perairan, misal: danau, sungai, waduk maka sangat bermanfaat untuk dijadikan sumber penggerak dari generator listrik. Seperti yang sudah ada, yaitu pembangkit listrik tenaga air (PLTA). Menurut fakta di lapangan bahwasanya ada beberapa PLTA dari sekian ratus PLTA di Indonesia yang hasil outputnya tidak maksimal akibat dari pengoperasian pembangkit untuk memproduksi energi listrik yang terus-menerus. Kemudian karena pengoperasian yang berlangsung terus-menerus maka akan terjadi penurunan unjuk kerja disebabkan beberapa faktor, yaitu debit air yang berubah-ubah, elevasi waduk yang berubah-ubah dan tingkat kavitasi pada turbin air. Maka dari itu, untuk memperbaikinya diperlukan perhitungan dan perencanaan yang handal agar diketahui unjuk kerja turbin sehingga bisa meningkatkan performa dan menghasilkan output sesuai kapasitas dari pembangkit itu sendiri. Sehingga bisa dijadikan referensi untuk perhitungan unjuk kerja ke depannya dan ketersediaan energi listrik bisa meningkat serta memenuhi kebutuhan energi listrik Indonesia.

1.2 Rumusan Permasalahan

Adapun rumusan permasalahan dari Tugas Akhir ini adalah:

- a. Bagaimana unjuk kerja turbin Francis?
- b. Bagaimana tingkat kavitasi ditinjau dari hubungan antara kecepatan spesifik dengan koefisien kavitasi?
- c. Bagaimana pengaruh tingkat kavitasi terhadap unjuk kerja turbin Francis?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari Tugas Akhir ini adalah:

- a. Unjuk kerja turbin Unit 2 pada beban minimum operasi, yakni 20 MW.
- b. Air diasumsikan pada suhu 20°C.
- c. Tekanan atm pada perhitungan head efektif diabaikan.

- d. Luasan permukaan air waduk (A_1) diasumsikan ∞ (tak hingga).
- e. Debit awal (Q_1) diasumsikan 0 (nol).
- f. Tingkat kavitasi berdasarkan hubungan antara koefisien kavitasi dan kecepatan spesifik.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari Tugas Akhir ini adalah:

- a. Mengetahui unjuk kerja turbin Francis.
- b. Mengetahui tingkat kavitasi berdasarkan hubungan antara koefisien kavitasi dengan kecepatan spesifik.
- c. Mengetahui pengaruh tingkat kavitasi terhadap unjuk kerja turbin Francis.

1.5 Metode Penulisan

Dalam penulisan Tugas Akhir ini digunakan metode penulisan sebagai berikut:

- a. Studi Literatur
Dengan cara mempelajari literatur-literatur yang ada di perpustakaan PLTA Sutami untuk menambah wawasan mengenai turbin air khususnya turbin Francis.
- b. Observasi
Dengan cara melakukan peninjauan langsung pada PLTA Sutami, Malang, Jawa Timur untuk mengetahui secara langsung turbin Francis dan melakukan pengambilan data-data turbin yang akan digunakan untuk perhitungan unjuk kerja turbin.
- c. Perhitungan dan Analisa
Dengan cara menghitung data-data yang didapat dari observasi dan menganalisanya.
- d. Kesimpulan
Mengetahui unjuk kerja turbin Francis dan hubungan antara faktor-faktor di dalamnya serta menentukan pengaruh tingkat kavitasi terhadap unjuk kerja turbin Francis.

1.6 Sistematika Penulisan

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini membahas tentang latar belakang dibuatnya Tugas Akhir ini, permasalahan yang diangkat, batasan masalah, tujuan, metode penulisan, sistematika penulisan dan manfaat dari Tugas Akhir ini.

BAB II DASAR TEORI

Bab ini berisi tentang teori dasar yang mendasari penyusunan laporan Tugas Akhir ini.

BAB III METODOLOGI

Bab ini berisi tentang prosedur penelitian, data-data hasil penelitian pada model instalasi turbin Francis.

BAB IV PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi tentang perhitungan data-data hasil penelitian dan analisisnya sehingga didapatkan kesimpulan tentang unjuk kerja turbin Francis dan pengaruh tingkat kavitasi terhadapnya.

BAB V KESIMPULAN

Bab ini berisi tentang kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian yang merupakan jawaban dari permasalahan yang diangkat pada penelitian Tugas Akhir ini.

1.7 Manfaat

Berikut manfaat dari Tugas Akhir ini:

- a. Dapat memberikan referensi unjuk kerja turbin Francis kepada perusahaan.
- b. Dapat mengetahui tingkat kavitasi pada turbin Francis.
- c. Dapat mengetahui pengaruh tingkat kavitasi terhadap unjuk kerja turbin Francis.

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Air

2.1.1 Prinsip Pembangkit Listrik Tenaga Air

Pembangkit Listrik Tenaga Air adalah suatu pembangkit yang memanfaatkan perubahan tenaga dari tenaga potensial air dengan ketinggian dan debit tertentu menjadi tenaga listrik. Pengubahan ini menggunakan peralatan turbin dan generator, yang kemudian daya listrik yang dihasilkan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P = g \times Q \times H \quad (2.1)$$

Keterangan:

P = Daya output (W)

H = Elevasi jatuh air efektif (m)

Q = Debit air (m^3/s)

g = Konstanta percepatan gravitasi $9,82 \text{ m/s}^2$

Dari rumusan di atas maka hasil keluaran daya dari generator diperoleh dari hasil tinggi jatuh dan debit air. Sehingga faktor yang mempengaruhi daya pembangkitan tenaga air berada pada tinggi jatuh efektif air dan debit air yang besar. Pada umumnya, debit air yang besar membutuhkan fasilitas penampungan dengan ukuran yang besar untuk penampungan pengambilan air, saluran air dan turbin. Sehingga secara ekonomis tinggi jatuh air yang lebih tinggi akan menguntungkan.

Faktor-faktor pembangkitan listrik tenaga listrik di atas masih belum didasarkan pada faktor efisiensi dari setiap peralatan seperti efisiensi dari turbin dan generator. *Error* yang disebabkan oleh peralatan juga dapat mengurangi jumlah daya yang dihasilkan dari suatu pembangkit.

2.1.2 Perubahan Energi di PLTA

Energi pada PLTA terkandung pada fluida atau aliran zat cair yang memiliki energi potensial dalam proses aliran dalam pipa. Energi potensial ini akan secara perlahan berubah menjadi energi kinetik berdasarkan pada cepat laju zat cair dalam pipa. Perubahan ini berdasarkan pada ketinggian zat cair dalam pipa atau tinggi jatuh air dalam pipa. Energi kinetik tersebut akan dapat berubah menjadi energi kinetik jika aliran air/laju aliran air pada suatu pipa mendorong turbin untuk bergerak.

2.1.2.1 Energi Potensial

Air merupakan energi potensial didasarkan pada ketinggian atau perbedaan kedudukan dari tinggi jatuh. Berdasarkan ini maka tinggi jatuh dapat menjadi berbeda sehingga dibutuhkan suatu turbin yang bervariasi dengan ketinggian yang berbeda untuk mengubah energi potensial air menjadi energi gerak.

Energi potensial yang ada pada bendungan adalah

$$E = m \times h \times g \quad (2.2)$$

Keterangan:

m = massa air (kg)

h = ketinggian terjunan (m)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

Sehingga daya yang dibangkitkan adalah

$$P = \rho \times Q \times g \times h \quad (2.3)$$

Keterangan:

P = daya (Watt)

Q = kapasitas aliran (m^3/s)

ρ = densitas air (kg/m^3)

2.1.2.2 Energi Kinetik

Energi pada air ini tidak hanya berdasarkan memanfaatkan jatuhnya air (*hydropower*) tetapi juga dapat diperoleh dari aliran datar pada pipa pesat. Energi yang terkandung pada pipa ini berdasarkan pada energi kinetiknya.

$$E = \frac{1}{2} \times m \times v^2 \quad (2.4)$$

Keterangan:

v = kecepatan aliran air (m/s)

m = massa air (kg)

Sehingga daya yang dihasilkan adalah

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times Q \times v^2 \quad (2.5)$$

Dengan perumusan bahwa Q adalah $A \times v$ maka

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \quad (2.6)$$

Keterangan:

A = luas penampang aliran air (m²)

2.1.2.3 Energi Mekanik

Energi yang digunakan untuk menggerakkan poros antara sudu jalan dalam ruang turbin.

2.1.2.4 Energi Listrik

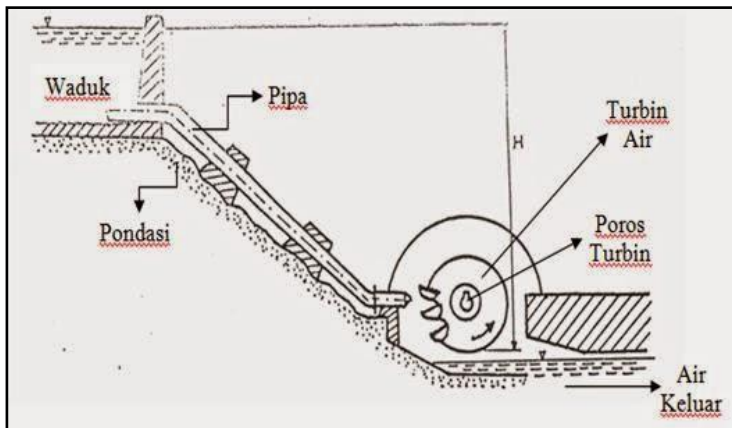
Energi listrik terjadi karena putaran poros turbin yang memutar poros generator. Melalui peralatan generator berprinsip bahwa suatu medan magnet yang diputar memotong kumparan/konduktor pada generator akan menimbulkan tegangan.

Tegangan tersebut akan melalui suatu konduktor yang terhubung singkat (*short circuit*) sehingga akan menghasilkan arus.

2.2 Turbin Air

2.2.1 Pengertian Turbin Air

Turbin air adalah turbin dengan air sebagai fluida kerja. Air mengalir dari tempat yang lebih tinggi menuju ke tempat yang lebih rendah. Dalam hal tersebut air memiliki energi potensial. Dalam proses aliran di dalam pipa energi potensial berangsur-angsur berubah menjadi energi kinetik. Di dalam turbin energi kinetik air diubah energi mekanis, dimana air memutar roda turbin. [1]



Gambar 2.1 Instalasi Turbin Air [6]

2.2.2 Klasifikasi Turbin Air

2.2.2.1 Berdasarkan Prinsip Kerjanya

2.2.2.1.1 Turbin Impuls

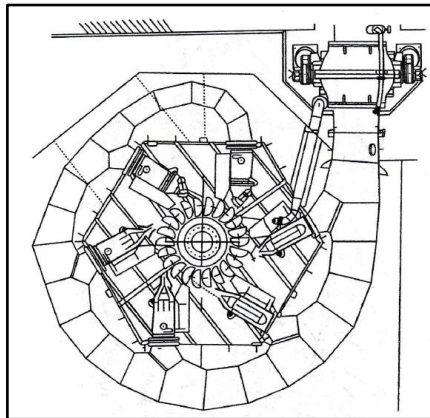
Turbin Impuls adalah turbin air yang cara kerjanya merubah energi potensial air (yang terdiri dari energi potensial, energi tekanan dan energi kecepatan) yang tersedia menjadi

energi mekanik yang memutar turbin. Energi potensial air diubah menjadi energi kinetik pada *nozzle*. Air keluar *nozzle* yang mempunyai kecepatan tinggi membentur sudu turbin dan tekanannya pun tidak berubah saat melalui *runner* dan keluar dari *runner* (konstan). Setelah membentur sudu, arah kecepatan aliran berubah sehingga terjadi perubahan momentum (*impulse*). Akibatnya roda turbin akan berputar.

Macam–macam Turbin Impuls:

a. Turbin Pelton

Turbin ini memiliki 2 bagian utama, yaitu *runner* dan *nozzle*. *Runner* terdiri dari poros 1 tangki, piringan dan beberapa mangkuk turbin Pelton terutama digunakan untuk memanfaatkan potensi hidro tinggi dengan aliran kecil.

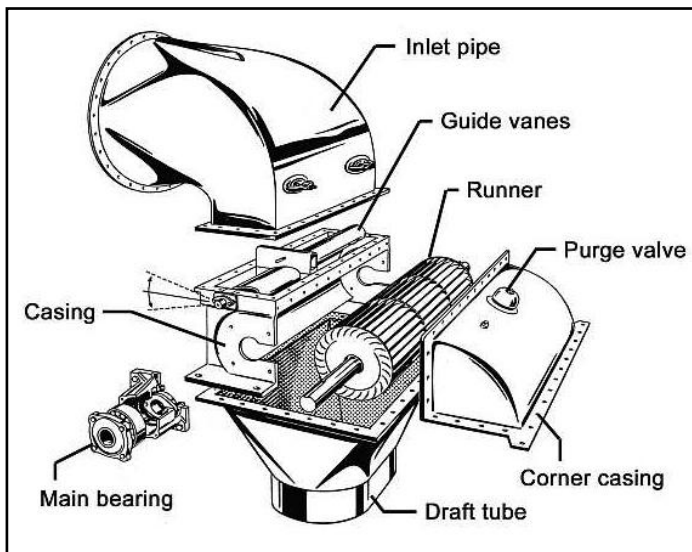


Gambar 2.2 Turbin Pelton [5]

b. Turbin Michell-Banki

Turbin jenis ini sering disebut dengan turbin arus lintang (*cross flow*), karena fluida, yaitu air menggerakkan sudu *runner* melewati pengarah sehingga seolah-olah terdapat fluida yang datang dari aliran yang berbeda.

Turbin Michell-Banki terdiri dari *runner* dan *nozzle*. Prinsip kerjanya, yaitu air yang keluar dari *nozzle* ditumbukkan ke *runner* sehingga terjadi perubahan energi dari energi kinetik air menjadi energi mekanik pada poros *runner*. Turbin ini banyak digunakan pada head rendah hingga menengah untuk kapasitas hingga 5 m³/s. Keunggulan konstruksinya sederhana, putaran operasi cukup tinggi dan efisiensinya stabil pada perubahan beban hingga 40% dari beban maksimum.



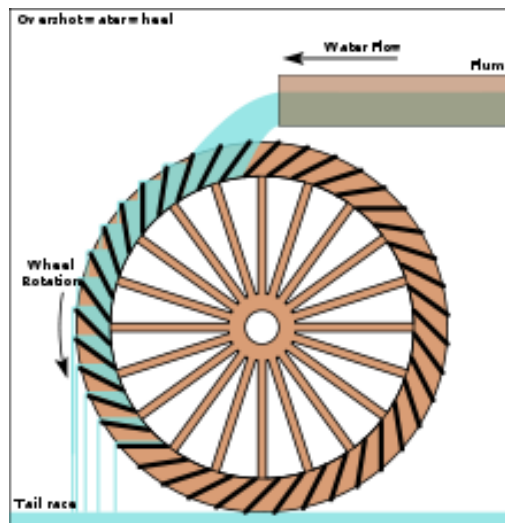
Gambar 2.3 Turbin Michell-Banki [7]

c. Kincir Air

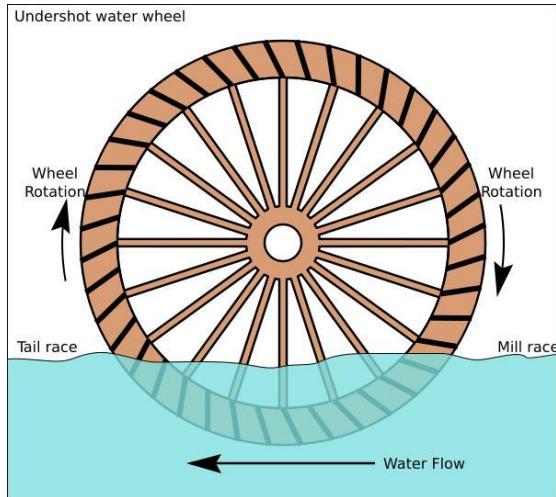
Pada kincir air, air ditumbukkan ke mangkuk-mangkuk yang dipasang pada piringan motor (roda berputar) sehingga terjadi perubahan energi kinetik menjadi energi mekanik. Kincir air bekerja pada putaran rendah sehingga memerlukan pemercepat putaran dengan perbandingan putaran yang tinggi untuk mencapai putaran generator. Kincir air memiliki ciri konstruksi sederhana

dan diameter besar. Pada penggunaannya kincir air banyak digunakan untuk head dan kapasitas kecil, karena diameter besar bekerja pada putaran rendah. Pemanfaatan energi air dalam skala kecil dapat berupa penerapan kincir air dan turbin. Dikenal ada tiga jenis kincir air berdasarkan sistem aliran airnya, yaitu: *overshot*, *breast-shot*, dan *under-shot*.

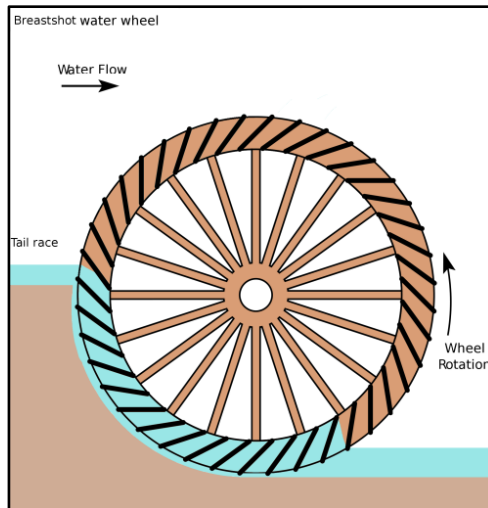
Pada kincir *overshot*, air melalui atas kincir dan kincir berada di bawah aliran air. Air memutar kincir dan air jatuh ke permukaan lebih rendah. Kincir bergerak searah jarum jam. Pada kincir *breast-shot*, kincir diletakkan sejajar dengan aliran air sehingga air mengalir melalui tengah-tengah kincir. Air memutar kincir berlawanan dengan arah jarum jam. Pada kincir *under-shot*, posisi kincir air diletakkan agak ke atas dan sedikit menyentuh air. Aliran air yang menyentuh kincir menggerakkan kincir sehingga berlawanan arah dengan jarum jam.



(a)



(b)



(c)

Gambar 2.4 (a) Kincir Air *Overshot*, (b) Kincir Air *Under-shot*, (c) Kincir Air *Breast-shot* [12]

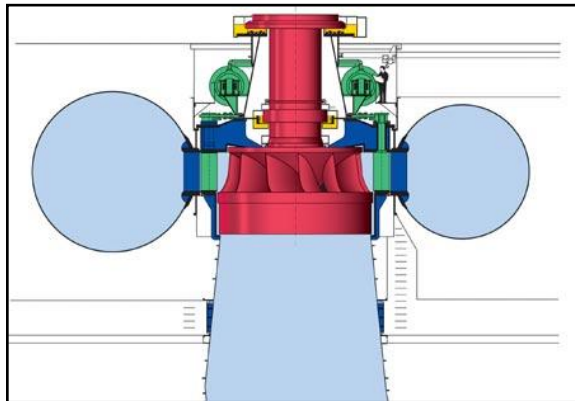
2.2.2.1.2 Turbin Reaksi

Turbin dimana proses ekspansi fluida kerjanya terjadi pada sudu tetap dan sudu geraknya.

Macam–macam Turbin Reaksi:

a. Turbin Francis

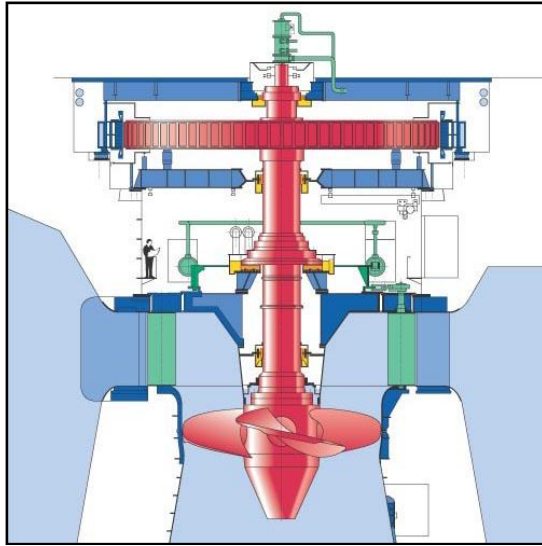
Turbin Francis yaitu turbin yang dikelilingi dengan sudu pengarah dan semuanya terbenam ke dalam air. Turbin Francis digunakan untuk pemanfaatan potensi menengah. Turbin Francis sudah bisa dibuat dengan kecepatan putar yang tinggi.



Gambar 2.5 Turbin Francis [8]

b. Turbin Kaplan

Turbin baling–baling dikembangkan sedemikian rupa sehingga suatu turbin dapat berputar di dalam lahar panas. Selain itu, sudu-sudu dapat diatur sesuai dengan kondisi operasi pada saat itu. Keuntungan memilih turbin Kaplan, yaitu kecepatan putaran bisa dipilih lebih tinggi, ukurannya lebih kecil karena roda turbin bisa dihubungkan langsung dengan generator. Harganya murah bila dipakai pada saat pembangkit yang besar.



Gambar 2.6 Turbin Kaplan [9]

2.2.2.2 Berdasarkan Daerah Operasi Turbin

Tabel 2.1 Klasifikasi Turbin Air Berdasarkan Daerah Operasi Turbin

Jenis Turbin	Variasi Head (m)
Kaplan dan Propeller	$2 < H < 20$
Francis	$10 < H < 350$
Pelton	$50 < H < 1000$
Crossflow	$6 < H < 100$
Turgo	$50 H < 250$

2.2.2.3 Berdasarkan Kecepatan Spesifik

Tabel 2.2 Klasifikasi Turbin Air Berdasarkan Kecepatan Spesifik

Jenis Turbin	Kecepatan Spesifik (rpm)
Turbin Pelton	$12 \leq N_s \leq 25$
Turbin Francis	$60 \leq N_s \leq 300$
Turbin Crossflow	$40 \leq N_s \leq 200$
Turbin Propeller	$250 \leq N_s \leq 1000$

2.2.2.4 Berdasarkan Putaran Nominal dan *Run-away Speed* Turbin

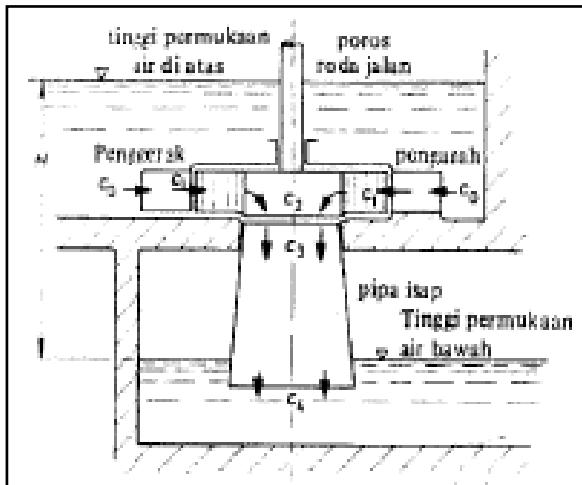
Tabel 2.3 Klasifikasi Turbin Berdasarkan Putaran Nominal dan *Run-away Speed* Turbin

Jenis Turbin	Putaran Nominal, N (rpm)	<i>Run-away Speed</i>
Semi Kaplan (single regulated)	75-100	2-2.4
Kaplan (double regulated)	75-150	2.8-3.2
Small-medium Kaplan	250-700	2.8-3.2
Francis (medium & high head)	500-1500	1.8-2.2
Francis (low head)	250-500	1.8-2.2
Pelton	500-1500	1.8-2
Crossflow	100-1000	1.8-2
Turgo	600-1000	2

2.2.3 Turbin yang Digunakan untuk Tugas Akhir ini (Turbin Francis)

2.2.3.1 Pengertian Turbin Francis

Turbin Francis merupakan jenis turbin tekanan lebih. Sudunya terdiri atas sudu pengarah dan sudu jalan yang keduanya terendam dalam air. Perubahan energi terjadi seluruhnya dalam sudu pengarah dan sudu gerak, dengan mengalirkan air ke dalam sebuah terusan atau dilewatkan ke dalam sebuah cincin yang berbentuk spiral atau rumah keong. [14]



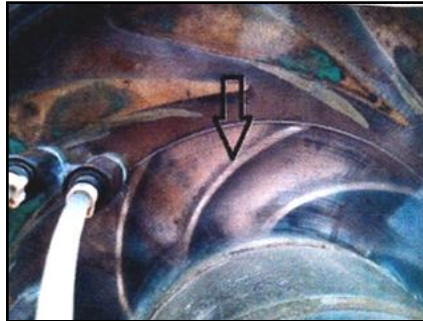
Gambar 2.7 Skema Instalasi Turbin Francis [14]

2.2.3.2 Bagian-bagian Turbin Francis

Turbin Francis merupakan salah satu turbin reaksi. Turbin dipasang di antara sumber air tekanan tinggi di bagian masuk dan air bertekanan rendah di bagian keluar. Turbin ini mempunyai 3 bagian utama, yaitu *runner*, *guide vane* (sudu pengarah), dan *casing* (rumah turbin).

a. *Runner*

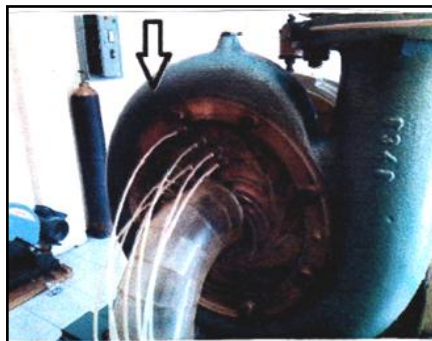
Merupakan bagian turbin Francis yang dapat berputar, terdiri dari poros dan sudu turbin yang berfungsi mengubah energi kinetik menjadi energi mekanik.



Gambar 2.8 *Runner* [11]

b. *Casing*

Merupakan saluran yang menyerupai rumah siput dengan bentuk penampang melintang lingkaran. Berfungsi menampung fluida yang terletak keluar *guide vane* dan memaksimalkan energi tekanan.



Gambar 2.9 *Casing* [12]

c. *Guide Vane*

Berfungsi sebagai pengarah aliran air dari katup pengatur kapasitas dari *casing* ke *runner* dan berfungsi menaikkan kecepatan aliran air sebelum menuju *runner*.



Gambar 2.10 *Guide Vane* [12]

d. *Inlet Pipe*

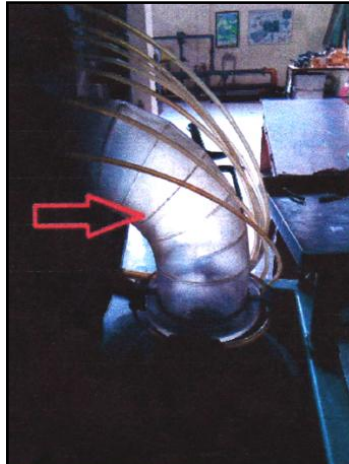
Merupakan bagian yang berfungsi untuk meneruskan air yang akan masuk ke *casing*.



Gambar 2.11 *Inlet Pipe* [12]

e. *Draft Tube*

Merupakan bagian yang berfungsi untuk meneruskan air dari turbin ke saluran pembuangan dengan menggunakan tinggi jatuh air.

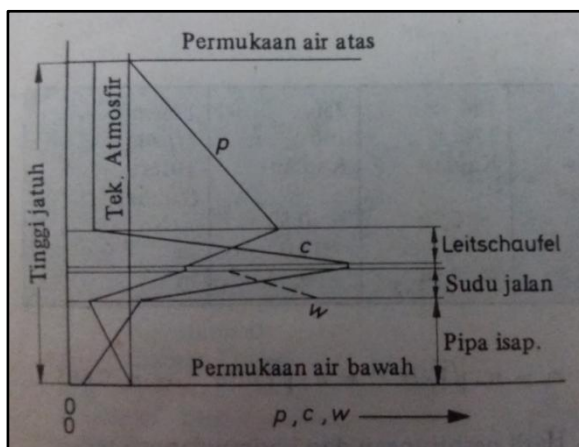


Gambar 2.12 *Draft Tube* [12]

2.2.3.3 Prinsip Kerja Turbin Francis

Turbin Francis bekerja dengan memakai proses tekanan lebih. Pada waktu air masuk ke roda jalan sebagai energi tinggi jatuh (*head drop*) yang menyimpan energi potensial, sebagian dari energi potensial telah bekerja di dalam sudu pengarah diubah sebagai energi kinetik, maka kecepatan air melewati sudu pengarah menjadi lebih cepat sehingga bisa memutar sudu jalan. Dari putaran sudu jalan tersebut nantinya akan merubah energi kinetik tadi menjadi energi mekanik sehingga menghasilkan daya. Sisa energi tinggi jatuh yang telah bekerja di dalam sudu jalan akan dimanfaatkan dengan adanya pipa isap yang memungkinkan energi tinggi jatuh bekerja di dalam sudu jalan dengan semaksimal mungkin.

Pada sisi sebelah keluar roda jalan terdapat tekanan yang rendah (kurang dari 1 atm) dan kecepatan aliran air yang tinggi. Sedangkan di dalam pipa isap kecepatan aliran akan berkurang dan tekanannya kembali naik sehingga air dapat dialirkan keluar lewat saluran air bawah dengan tekanan seperti keadaan sekitarnya. Pipa isap pada turbin ini memiliki fungsi mengubah energi kecepatan menjadi energi tekanan. Jalannya tekanan dan kecepatan air ketika melewati dan berproses di dalam turbin secara informatif terdapat pada Gambar 2.13. [4]



Gambar 2.13 Jalannya Tekanan dan Kecepatan Air di Dalam Suatu Turbin Tekanan Lebih [4]

2.2.4 Kavitas

2.2.4.1 Pengertian Kavitas

Kavitas berasal dari kata “*Cavus*” (Latin) yang berarti kosong. Kavitas adalah suatu peristiwa terjadinya gelembung-gelembung uap di dalam aliran fluida apabila tekanan pada tempat-tempat tertentu lebih rendah dari tekanan uap fluida yang bersangkutan. Gelembung tersebut akan terbawa arus, apabila gelembung tersebut kemudian sampai di suatu daerah dimana

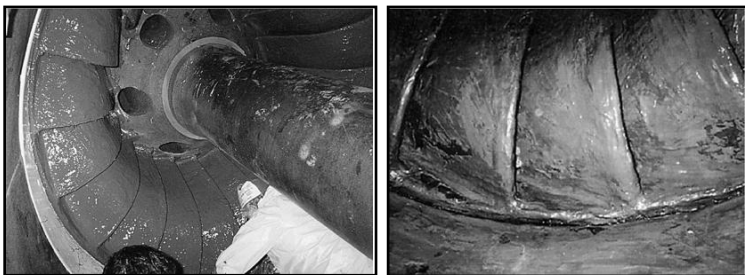
tekanannya melebihi tekanan uap maka gelembung tersebut akan pecah secara tiba-tiba dan terjadi kondensasi dari uap tadi. Pecahnya gelembung-gelembung ini akan menghasilkan tekanan yang sangat tinggi (kadang-kadang mencapai 100 atm).

Proses kondensasi ini berlangsung sangat cepat ($t < 0,003$ detik), sehingga partikel-partikel cairan akan membentur permukaan dinding dari sudu, pipa atau elemen-elemen lainnya dengan kecepatan yang sangat tinggi dan menimbulkan getaran pada dinding tersebut. [13]

2.2.4.2 Akibat Kavitasi

Dengan tekanan yang begitu tinggi pada peristiwa kavitasi sebagai akibatnya adalah sebagai berikut:

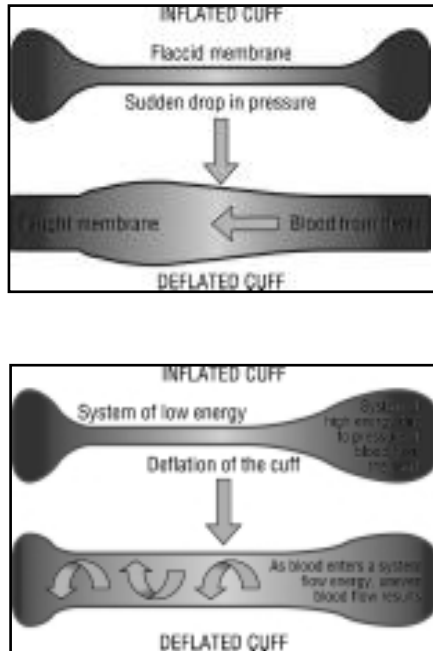
1. Menimbulkan suara yang sangat bising dan getaran-getaran yang sangat merusak instalasi turbin.
2. Mengikis bagian dalam pipa-pipa, permukaan *propeller* dan *runner*.
3. Akibat lebih parah *power swing* pada jaringan (tegangan turun naik).
4. Umur material menjadi pendek, berdampak kepada keandalan dan peningkatan biaya operasi dan pemeliharaan.
5. Menurunkan efisiensi dan daya turbin.



Gambar 2.14 Contoh Kerusakan Material Akibat Kavitasi [13]

2.2.4.3 Daerah Rawan Kavitasi

Pada daerah aliran dalam pipa yang tidak rata atau bersudut, bercabang akan terjadi turbulensi dan dapat terjadi kavitasi, contoh gambar dibawah ini.



Gambar 2.15 Daerah Rawan Kavitasi [13]

Pada daerah *runner*, sudu pengarah (*guide vane*) dan *draft tube*, kondisi yang cenderung terjadi kavitasi, maka bahan *guide vane* dan *runner* terbuat dari bahan yang keras dan tidak berkarat, serta *draft tube* dilapisi dengan cat anti karat.

2.2.4.4 Pencegahan Kavitas

Untuk mencegah terjadinya kavitas ini, maka perlu diambil langkah-langkah sebagai berikut:

1. Menghindarkan bentuk-bentuk yang tajam serta bergelombang sepanjang saluran instalasi.
2. Pemasangan letak instalasi yang tepat, yaitu letak turbin sedemikian rupa sehingga sesuai dengan perletakan antara *runner* dengan *draft tube*.

Perletakan turbin bergantung pada:

- a. Spesifikasi *speed*-nya yang berkaitan dengan instalasi dan faktor Thoma (σ)
 - b. Ketinggian jatuh air
 - c. Letak ketinggian turbin dari permukaan laut
3. Mempergunakan material yang cukup kuat pada tempat-tempat dimana diperkirakan kavitas akan terjadi.
 4. Memasang turbin pada tempat sebaik-baiknya, yaitu memperkecil jarak vertikal antara roda turbin dan permukaan air bawah (memperkecil tinggi isap).
 5. Memperbaiki konstruksi dan mengusahakan agar tidak terjadi belokan-belokan atau bentuk-bentuk yang tajam.
 6. Penambahan udara (*air injection system*).

2.2.4.5 Koefisien Kavitas

Mengenai koefisien kavitas (σ) perlu diterangkan lebih lanjut. [1]

$$\sigma = \frac{H_b - H_s}{H} \quad (2.7)$$

dimana, $H_b = H_{atm} - H_v$

sehingga,

$$\sigma = \frac{H_{atm} - H_v - H_s}{H} \quad (2.8)$$

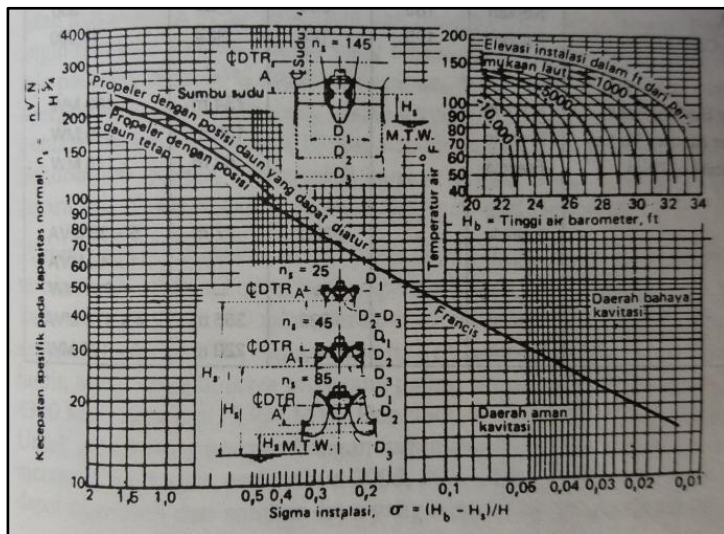
Keterangan:

H_{atm} = tekanan atmosfer (m H_2O); tergantung dari lokasi atau ketinggian turbin dari permukaan air laut

H_v = tekanan uap air (m H_2O); tergantung dari temperatur rata-rata air pada turbin

H_s = tinggi isap (m H_2O); jarak vertikal dari permukaan air bawah sampai titik dimana tekanannya minimum (pada roda Francis berada pada dasar roda)

H = tinggi jatuh efektif (m)

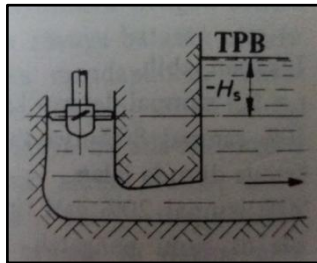


Gambar 2.16 Batas Terendah dari Sigma Instalasi untuk Menetapkan Letak Turbin [1]

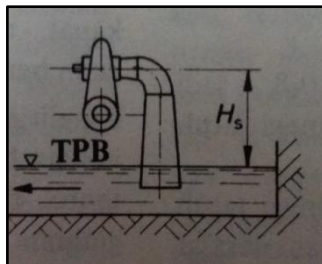
Gambar 2.16 menyatakan hubungan antara koefisien kavitasi (σ) dan kecepatan spesifik (n_s) yang diperoleh dari pengujian terhadap bermacam-macam turbin. Harga σ tersebut merupakan harga minimum (kritis) untuk instalasi turbin yang bersangkutan (n_s tertentu), dimana di bawah harga tersebut besar kemungkinan terjadi kavitasi. Jadi, untuk mencegah terjadinya

kavitasi, haruslah diusahakan supaya dalam segala keadaan, σ dari instalasi tidak lebih rendah daripada σ yang diperoleh dari grafik tersebut dalam Gambar 2.16.

Di sebelah kanan atas dari Gambar 2.16 dapat dicari harga H_b yang sesuai, sehingga dengan pertolongan persamaan (2.7) dapatlah ditetapkan H_s yang maksimum. H_s yang negatif menunjukkan bahwa turbin (bagian dasar roda) harus berada di bawah permukaan air bawah (Gambar a). Sedangkan, H_s yang positif menunjukkan bahwa turbin (bagian dasar roda) harus berada di atas permukaan air bawah (Gambar b).



(a)



(b)

Gambar 2.17 Nilai H_s dan Posisi Turbin terhadap Permukaan Air Bawah [4]

2.2.5 Peralatan Utama PLTA Sutami dan Turbin Francis PLTA Sutami

2.2.5.1 Bendungan

Bendungan berfungsi sebagai tempat penampungan air dari berbagai sungai dan sumber air mengalir yang berguna sebagai penggerak turbin dan airnya di salurkan melalui pipa *penstock* untuk menggerakkan turbin. Bendungan Karangates memiliki konstruksi terdiri beberapa lapisan, yaitu:

1. *Rock Zone* (lapisan batu)
Lapisan ini merupakan lapisan paling luar dari bendungan dan terdiri dari batu–batuan yang ditimbun. Lapisan yang menghadap waduk disebut “*up stream*” sedangkan yang membelakangi waduk disebut “*down stream*”.
2. *Filter Zone* (lapisan penyaring)
Batu yang digunakan pada lapisan ini lebih kecil dibanding dengan batu lapisan *rock zone*.
3. *Transition Zone* (lapisan transisi)
Batu yang digunakan pada lapisan ini besarnya antara *rock zone* dan *filter zone*.
4. Lapisan Kedap Air
Lapisan ini terdiri dari batu kapur dan tanah liat yang bersifat menahan air.

Tabel 2.4 Data Bendungan PLTA Sutami

Type	Rock Fill
Panjang puncak	823,5 m
Lebar puncak	13,7 m
Tinggi	97,5 m
Lebar dasar	400 m
Volume	6.156.000 m ³
Elevasi puncak	279 m
Elevasi dasar	-

2.2.5.2 Waduk

Waduk PLTA Sutami berasal dari dua waduk, yaitu Waduk Sutami dan Waduk Lahor. Waduk ini berfungsi untuk menampung air hujan, waduk PLTA Sutami merupakan waduk tahunan. Adapun data teknik dari waduk PLTA Sutami adalah sebagai berikut:

Tabel 2.5 Data Teknik Waduk PLTA Sutami

Kapasitas Maksimal	343.000.000m ³
Kapasitas efektif	253.000.000m ³
Daerah terendam	15km ²
Pengaliran	2.050km ²
Elevasi HWL	273 m
Elevasi LWL	246 m



Gambar 2.18 Waduk PLTA Sutami [11]

2.2.5.3 *Spillway* (Saluran Pelimpah)

Spill Way berfungsi untuk melimpahkan air waduk saat terjadi kelebihan elevasi maksimal yang telah ditetapkan pada kondisi normal, untuk mencegah banjir dan mencegah rusaknya bendungan akibat meluapnya air banjir melalui puncak serta untuk menjaga kestabilan air waduk. Adapun data teknik *Spill Way* adalah:

Tabel 2.6 Data Teknik *Spill Way* PLTA Sutami

Type	Open cut memakai pintu air
Panjang Saluran	460 m
Kapasitas	1600 m ³ /detik
Jembatan beton panjang	12 m
Jembatan beton pendek	9,3 m
Jembatan baja panjang	12 m
Jembatan baja lebar	9,3 m



Gambar 2.19 *Spill Way* PLTA Sutami [11]

2.2.5.4 Pintu–Pintu Air

2.2.5.4.1 Saluran Atas (*Head Race*)

Terowongan *head race* berfungsi untuk mengalirkan air dari waduk menuju turbin melalui pipa pesat (*penstock*), terletak 47 meter di bawah puncak bendungan. Data teknik dari terowongan *head race* adalah:

Tabel 2.7 Data Teknik Terowongan *Head Race* PLTA Sutami

Jumlah	3 buah
Diameter	3,4 m

2.2.5.4.2 *Intake Gate*

Intake Gate (tiga set *Intake Gate*) terdiri dari *gate leaf* dengan *by pass valve*, *house guide frame*. *Intake gate* berfungsi untuk menutup dan membuka air yang akan masuk menuju ke turbin. Adapun data teknik *Intake Gate* dengan spesifikasi:

Tabel 2.8 Data Teknik *Intake Gate* PLTA Sutami

<i>Type</i>	<i>Fixed Gradian</i>
Lebar dan tinggi	3,4 m
Bahan	SM.SL-B-SS41
Berat	80,816 m
Maksimal head	43,9 m
Tinggi Angkat	47 m
Operation speed normal	1 m/menit
Operation speed darurat	2 m/menit

2.2.5.4.3 *Intake Trash Rack*

Intake Trash Rack dengan spesifikasi sebagai berikut

Tabel 2.9 Data Teknik *Intake Trash Rack* PLTA Sutami

<i>Type</i>	<i>Fixed Gradien</i>
Lebar	8 m

Maksimum head	3 m
Bar pitch	75 m
Tinggi	13,9 m

2.2.5.4.4 Saluran Bawah (*Tail Race*)

Merupakan saluran pembuangan air setelah turbin beroperasi. Data *Tail Race* sebagai berikut:

Tabel 2.10 Data Teknik *Tail Race* PLTA Sutami

Tinggi elevasi waduk	272,5 m
Tinggi elevasi tail race	182 m
Tinggi elevasi unit 1 operasi	181,8 m (normal)
Tinggi elevasi unit 2 operasi	182 m (normal)
Tinggi elevasi unit 3 operasi	182,8 (normal)



Gambar 2.20 *Tail Race* PLTA Sutami [11]

2.2.5.5 Surge Tank

Surge Tank berfungsi menyerap tekanan air yang tiba-tiba terjadi pada pipa pesat apabila debit air yang masuk ke turbin berkurang atau berhenti. *Surge Tank* merupakan bagian pengaman PLTA jika terjadi perubahan tekanan baik karena perubahan elevasi waduk, tekanan gelombang dan adanya *water hammer*

akibat benturan dari waduk. Data teknik dari *Surge Tank* sebagai berikut:

Tabel 2.11 Data Teknik *Surge Tank* PLTA Sutami

Diameter <i>Surge Tank</i>	7 m
Tinggi	50 m
Jumlah	3 buah



Gambar 2.21 *Surge Tank* PLTA Sutami [11]

2.2.5.6 Pipa Pesat (*Penstock*)

Pipa antara tangki pendatar dengan turbin yang berfungsi untuk mengalirkan air dari terowongan tekan menuju ke turbin. Adapun data teknik dari *penstock* adalah:

Tabel 2.12 Data Teknik Pipa Pesat (*Penstock*) PLTA Sutami

Jumlah	3 jalur
Diameter dalam	3,400mm - 3,200 mm
Berat	616,175 ton
Tinggi tekanan maksimal	133,069 m
Bahan	SM 41B, SM 50B
Tebal pipa	11 - 19 mm
Panjang pipa pesat no.1	288,788 m
Panjang pipa pesat no.2	223, 789 m
Panjang pipa pesat no.3	27, 457 m



Gambar 2.22 *Penstock* PLTA Sutami [11]

2.2.5.7 Turbin

Turbin adalah alat untuk merubah energi kinetik menjadi energi putar, yang kemudian tenaga putar ini ditransmisikan melalui poros vertikal generator yang terpasang seporos di atas turbin. Sedangkan turbin sendiri dikontrol dengan *governor*

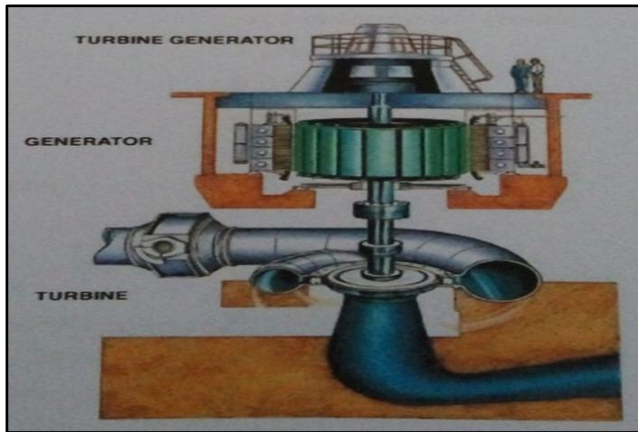
hidrolik. PLTA Sutami sendiri menggunakan jenis turbin Francis untuk ketiga unit operasinya. Turbin Francis merupakan turbin dengan konstruksi air mengalir ke *runner* dengan arah radial dan keluar dengan arah aksial, perubahan arah terjadi ketika melewati *runner*. Adapun data teknik dari turbin adalah:

Tabel 2.13 Data Teknik Turbin PLTA Sutami

<i>Type</i>	<i>Vertical Francis – IRS</i>
<i>Efektif head</i>	85,4 m
<i>Max discharge</i>	53,5 m ³ /detik
Max Ouput	36 MW
Putaran	250 rpm
<i>Standart Specification</i>	JEC-151 (1968)
<i>Run away speed</i>	456 rpm
Jumlah	3 unit



Gambar 2.23 Turbin PLTA Sutami [11]



Gambar 2.24 Struktur TurbinPLTA Sutami [11]

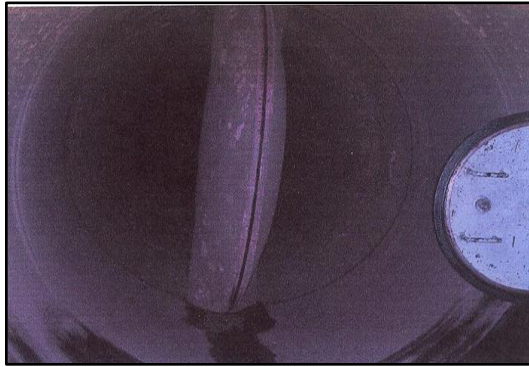
2.2.5.8 *Inlet Valve*

Inlet Valve berfungsi untuk menghentikan aliran air yang menuju ke turbin. Pada waktu turbin beroperasi *inlet valve* terbuka penuh dan pada waktu tidak beroperasi *inlet valve* tertutup. *Inlet valve* digerakkan oleh *servo motor* yang bekerja secara hidrolis.

Bypass valve dipasang secara paralel dengan *inlet valve* dengan bagian belakang dan bagian depan *inlet valve* tekanan sama kemudian *inlet valve* dibuka. Spesifikasi dari *inlet valve* adalah:

Tabel 2.14 Data Teknik *Inlet Valve* PLTA Sutami

<i>Type</i>	<i>Butterfly</i>
Diameter	3,2 m
Panjang	1,2 m
Kapasitas Servo Motor	62.000 kg/m
Pergeseran Volume	Katup Utama : 246 liter
	Katup <i>Bypass</i> : 4,15 liter



Gambar 2.25 *Inlet Valve* PLTA Sutami [11]

2.2.5.9 Generator

Generator adalah sebuah alat yang memproduksi energi listrik dari sumber energi mekanik, biasanya dengan menggunakan induksi elektromagnetik. Generator dihubungkan dengan turbin melalui gigi-gigi putar sehingga ketika baling-baling turbin berputar maka generator juga ikut berputar. Generator selanjutnya merubah energi mekanik dari turbin menjadi energi elektrik. Generator di PLTA bekerja seperti halnya generator pembangkit listrik lainnya. Generator mendorong muatan listrik untuk bergerak melalui sebuah sirkuit listrik eksternal, tetapi generator tidak menciptakan listrik yang sudah ada di dalam kabel lilitannya. PLTA Sutami terdiri dari 3 unit pembangkit utama yang terletak dilantai B2 dimana turbin berada di bawah lantai B2 tersebut.

Generator dapat dilihat langsung dari ruang operator (kontrol). Generator yang terdiri dari 3 unit tersebut terletak saling sejajar dan pada masing-masing generator terdapat sebuah *upper bearing* yang terletak di atas rotor dan *lower bearing* yang letaknya di bawah. Kedua-duanya berfungsi sebagai bantalan poros yang arahnya termasuk gaya radial dan *thrust bearing* berada di bawah rotor yang berfungsi mendukung beban maksimal dari mesin utama dan *hidrolik force*.

Adapun data teknik dari generator adalah:

Tabel 2.15 Data Teknik Generator PLTA Sutami

<i>Type</i>	<i>Kvc Vertical Shaft Semi Umberella</i>
Kapasitas	39.000 kVa
Tegangan	11 Kv
Frekuensi	50 Hz
Form	RCU
<i>Type</i>	TAK
Putaran	250 rpm
Ampere	2047 A
Jumlah	3 Unit
Pole	24 <i>pole salient pole</i>
Pendingin	<i>recirculating air cooler</i>
<i>Phase</i>	3 phasa
<i>Power factor</i>	0,9
<i>Rating</i>	<i>Continue</i>
<i>Ambient Temperatur</i>	40 ⁰ C
<i>Armatatur Temperatur rise</i>	75 ⁰ C
<i>Field Ampere</i>	720 A
<i>Field Tempt Rise</i>	75 ⁰ C
<i>Excitation voltage</i>	220 V
<i>Stator Instalasi Class</i>	B
<i>Rotor Instalasi Class</i>	B
<i>Standart Spesifikasi</i>	JEC-114 (1964)
<i>Serial Number</i>	7110320



Gambar 2.26 Generator PLTA Sutami [11]

2.2.5.10 Penguat Medan (*Exciter*)

Penguat medan digunakan sebagai pelengkap generator yang merupakan sebuah DC generator yang seporos dengan setiap generator utama berfungsi untuk memberikan eksitasi pada generator yang bersangkutan sesuai dengan spesifikasinya:

Tabel 2.16 Data Teknik *Exciter* PLTA Sutami

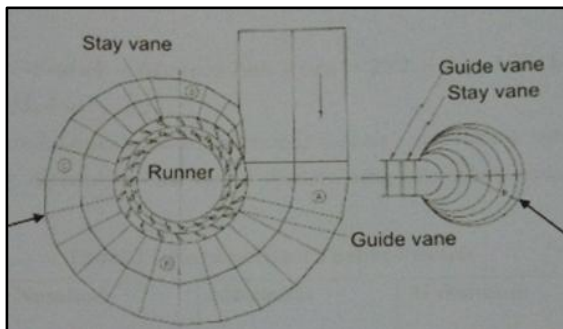
<i>Type</i>	<i>SMP-26</i>
Daya	175 Kw
<i>Excitation</i>	<i>Shunt (aux SEP)</i>
Tegangan	220 V
Kutub	12 poles
Arus	796 A
Pole	12
Putaran	250 rpm
Kelas isolasi	B
Kenaikan Suhu	70 ⁰ C



Gambar 2.27 *Exciter* PLTA Sutami [11]

2.2.5.11 *Guide Vane*

Guide vane berfungsi untuk mengatur arah debit air yang masuk ke *runner* yang berfungsi sebagai pengatur kecepatan dan daya turbin. Sedangkan untuk mengatur, membuka dan menutup *guide vane* menggunakan *servo motor*. Pada setiap unit terdapat 2 buah *servo motor* dan 20 buah *guide vane* yang dipasang pada setiap *spiral case* (rumah turbin) di sekeliling *runner*.



Gambar 2.28 *Guide Vane* PLTA Sutami [11]

2.2.5.12 Governor

Governor digunakan untuk mengubah besaran listrik menjadi besaran mekanis yang masih kecil sehingga dapat mengatur pemancar air agar sesuai dengan kebutuhan. Biasanya dilengkapi dengan *servo motor* sebagai penguat besaran mekanis tersebut. *Governor* digerakkan oleh poros dari turbin dengan perantara roda gigi atau sabuk. *Governor* digerakkan oleh *servo motor* yang energinya diambil dari aliran oli dari pompa roda gigi dan dengan mengatur katup kontrol.

Governor dibedakan menjadi :

1. *Mechanical Governor* menggunakan sistem lama yaitu dengan belt.
2. *Electrical Governor* menggunakan sistem baru yaitu dengan PMG.

Fungsi *Governor* :

1. Mengatur kecepatan
2. Mengatur frekuensi
3. Mengatur tegangan output generator

Turbin berputar normal karena beban telah seimbang dengan laju pancaran air, oli yang dipompa oleh roda gigi ke katup pengatur akan kembali lagi ke bak penampungan karena kedudukan katup pengatur dalam keadaan normal. Begitu pula dengan katup jarum dalam keadaan diam karena *servo motor* tidak bekerja.

Putaran turbin naik, gaya sentrifugal juga akan naik yang akan mengakibatkan turunnya kedudukan pendulum, pendulum merupakan bagian utama dari *governor* yang berada di katup distribusi dan peralatan-peralatan kontrol.

Keadaan naik dan turunnya pendulum tersebut ditransmisikan untuk menggerakkan *valve*, katup pendulum, katup kontrol dan katup *guide vane*. Jika pendulum turun maka *valve* akan menutup dan juga sebaliknya. Dengan demikian

kecepatan turbin akan cenderung menjadi konstan sehingga didapatkan frekuensi normal generator (50 Hz).

Kecepatan dari governor harus disesuaikan dengan kecepatan PMG atau kecepatan dari turbin. Pendulum yang digunakan sebagai *speed detecting governor* digerakkan oleh motor AC yang tegangan putarnya diambil dari tegangan listrik yang dihasilkan oleh PMG. Spesifikasi dari peralatan *governor* yang digunakan adalah:

Tabel 2.17 Data Teknik *Governor* PLTA Sutami

<i>Type</i>	<i>Governor Cabinet Actuator</i>
Kapasitas	20.000 kgm
Gaya Servo Motor pada Tekanan Rating	62.000 kg
<i>Displacement Volume</i> dari <i>Servo Motor</i>	40,2 x 2 lt
Sensitivitas dari Perubahan Kecepatan	0,01 %
Daerah dari Perubahan <i>Speed Drop</i>	0 – 6 %
Daerah Pengatur Kecepatan Turbin dengan Kecepatan Tetap	5 – 15 %
Tekanan Oli :	
- Normal	26 kg/cm ²
- Normal Minimum	24,5 kg/cm ²
- Allowable Minimum	17,5 kg/cm ²

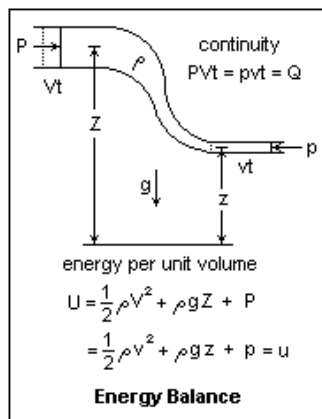


Gambar 2.29 Governor PLTA Sutami [11]

2.3 Persamaan yang Mendukung Penelitian

2.3.1 Persamaan Bernoulli

Persamaan Bernoulli bermula dari suatu persamaan energi fluida *incompressible* dalam aliran *steady* yang menyatakan bahwa total yang per partisipasi adalah tetap sepanjang satuan jarak. [12]



Gambar 2.30 Energy Balance [12]

Pada aliran air dalam pipa diambil suatu selisih ketinggian 2 antara tinggi air atas dan air bawah maka menurut Bernoulli aliran tersebut memiliki persamaan energi, yaitu:

W = Energi potensial + Energi kinetik + Energi tekanan yang besarnya konstan

$$W = m \cdot g \cdot z + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + p \cdot V = \text{konstan} \quad (2.9)$$

Kemudian dari persamaan energi di atas dibagi m maka didapat persamaan energi spesifik:

$$\frac{W}{m} = \frac{m \cdot g \cdot z_1 + p_1 \cdot V_1 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2}{m} = \frac{m \cdot g \cdot z_2 + p_2 \cdot V_2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_2^2}{m}$$

$$\frac{W}{m} = \frac{m \cdot g \cdot z_1}{m} + \frac{p_1 \cdot V_1}{m} + \frac{\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2}{m} = \frac{m \cdot g \cdot z_2}{m} + \frac{p_2 \cdot V_2}{m} + \frac{\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_2^2}{m}$$

Karena $p \cdot V = \text{konstan}$ sehingga $V_1 = V_2$ maka:

$$w = g \cdot z_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = g \cdot z_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} \quad (2.10)$$

Kemudian dari persamaan energi spesifik dibagi g sehingga didapat persamaan ketinggian:

$$\frac{w}{g} = \frac{g \cdot z_1}{g} + \frac{\frac{p_1}{\rho}}{g} + \frac{\frac{v_1^2}{2}}{g} = \frac{g \cdot z_2}{g} + \frac{\frac{p_2}{\rho}}{g} + \frac{\frac{v_2^2}{2}}{g}$$

$$H = z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (2.11)$$

Dimana: p = Tekanan	(N/m ²)
z = Ketinggian	(m)
g = Percepatan gravitasi	(m/s ²)
v = Kecepatan aliran	(m/s)

Syarat berlakunya hukum Bernoulli:

1. Alirannya *Steady*
2. Fluida *Incompressible*
3. *Non Viscous*
4. Aliran fluida searah dengan kecepatan

Untuk hubungannya dengan turbin semakin tinggi (z) maka energi potensial yang dihasilkan semakin besar sehingga akan berpengaruh pada energi kinetik dalam menubruk sudu. Dengan bertambahnya energi kinetik yang menabrak sudu maka putaran yang dihasilkan akan semakin besar.

2.3.2 Persamaan Head Efektif

Head efektif disini adalah tinggi air jatuh efektif (tinggi air jatuh bersih) suatu turbin air yang merupakan selisih dari head air atas dengan head air bawah. Head di sini adalah penjumlahan head tekanan, head kecepatan dan head elevasi. Persamaan head efektif diperoleh dari selisih persamaan ketinggian dalam persamaan Bernoulli (2.11).

$$H = z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2g}$$

$$H = H_1 = H_2$$

Maka head efektif adalah selisih H_1 dengan H_2 :

$$H_{eff} = H_1 - H_2$$

$$H_{eff} = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2g} \right)$$

$$H_{eff} = \left(\frac{p_1 - p_2}{\rho \cdot g} \right) + \left(\frac{v_1^2 - v_2^2}{2 \cdot g} \right) + (z_1 - z_2) \quad (2.12)$$

Keterangan:

H_{eff} = Head efektif (m)

p_1 = Tekanan permukaan air waduk (N/m²)

p_2 = Tekanan pada *draft tube* (N/m²)

ρ = Massa jenis air (kg/m³)

g = Percepatan gravitasi (m/s²)

v_1 = Kecepatan air di permukaan air waduk (m/s)

v_2 = Kecepatan air pada *draft tube* (m/s)

z_1 = Elevasi permukaan air waduk (m)

z_2 = Elevasi sensor tekanan *draft tube* (m)

2.3.3 Persamaan Daya Hidrolik

Daya Hidrolik adalah daya yang dihasilkan oleh air yang jatuh pada head tertentu dengan debit tertentu. Berikut adalah persamaan daya hidrolik:

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_{eff} \quad (2.13)$$

Keterangan:

P_h = Daya hidrolik (kW)

ρ = Massa jenis air (kg/m³)

g = Percepatan gravitasi (m/s²)

Q = Debit air (m³/s)

H_{eff} = Head efektif (m)

2.3.4 Persamaan Daya Turbin

Daya Turbin adalah daya yang dihasilkan oleh putaran turbin. Secara teoritis apabila diketahui daya generator dan efisiensi generator maka daya turbin merupakan hasil bagi daya generator dengan efisiensi generator. Sedangkan bila diketahui daya hidrolik dan efisiensi turbin maka daya turbin merupakan

hasil bagi daya hidrolik dengan efisiensi turbin. Dalam hal ini yang dipakai adalah persamaan daya turbin berdasarkan daya generator dan efisiensi generator. Berikut persamaan daya turbin berdasarkan daya generator dan efisiensi generator:

$$P_t = \frac{P_l}{\eta_g} \quad (2.14)$$

Keterangan:

P_t = Daya turbin (kW)

P_l = Daya generator (kW)

η_g = Efisiensi generator (%)

2.3.5 Persamaan Efisiensi Turbin

Efisiensi turbin adalah daya guna turbin dilihat dari perbandingan daya turbin (daya output) dengan daya hidrolik (daya input). Dari perhitungan efisiensi inilah kita dapat menilai unjuk kerja dari turbin air, yaitu semakin tinggi efisiensi yang dihasilkan maka akan semakin besar unjuk kerja yang dihasilkan. Semakin rendah efisiensi yang dihasilkan maka akan semakin rendah unjuk kerja yang dihasilkan. Berikut adalah persamaan efisiensi turbin:

$$\eta_t = \frac{P_t}{P_h} \times 100\% \quad (2.15)$$

Keterangan:

η_t = Efisiensi turbin (%)

P_t = Daya turbin (kW)

P_h = Daya hidrolik (kW)

2.3.6 Persamaan Kecepatan Spesifik

Kecepatan spesifik turbin merupakan kecepatan turbin dimana dapat dihasilkan untuk setiap tinggi air jatuh (H). Dengan diketahuinya kecepatan spesifik maka perencanaan dan pemilihan

jenis turbin menjadi lebih mudah. Dan juga dapat digunakan untuk mengetahui tingkat kavitasi pada turbin dengan cara menghubungkan kecepatan spesifik dengan koefisien kavitasi.

$$n_s = \frac{n\sqrt{P}}{(H)^{5/4}} \quad (2.16)$$

Keterangan:

n_s = Kecepatan spesifik (rpm)

n = Kecepatan nominal (rpm)

P = Daya turbin (kW)

H = Head efektif (m)

2.3.7 Persamaan Koefisien Kavitasi

Koefisien kavitasi adalah suatu nilai yang menunjukkan bahwa apakah suatu turbin memasuki daerah bahaya kavitasi atau daerah aman kavitasi. Sehingga nantinya bisa dibandingkan dengan kecepatan spesifik untuk mengetahui tingkat kavitasi. Koefisien kavitasi dinotasikan dengan bilangan Thoma (σ). Berikut persamaan koefisien kavitasi seperti persamaan (2.8):

$$\sigma = \frac{H_{atm} - H_v - H_s}{H}$$

Keterangan:

σ = Bilangan Thoma

H_{atm} = tekanan atmosfer (m H_2O); tergantung dari lokasi atau ketinggian turbin dari permukaan air laut

H_v = tekanan uap air (m H_2O); tergantung dari temperatur rata-rata air pada turbin

H_s = tinggi isap (m H_2O); jarak vertikal dari permukaan air bawah sampai titik dimana tekanannya minimum (pada roda Francis berada pada dasar roda)

H = tinggi jatuh efektif (m)

BAB III METODOLOGI

3.1 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam menyusun Tugas Akhir Analisa Unjuk Kerja dan Tingkat Kavitasasi pada Turbin Francis di PT PJB Unit Pembangkitan Brantas Unit PLTA Sutami adalah sebagai berikut:

3.1.1 Studi Literatur

Dengan cara mempelajari literatur-literatur yang ada di perpustakaan PLTA Sutami dan juga buku-buku tentang turbin air dari Perpustakaan ITS.

3.1.2 Observasi

Dengan cara melakukan peninjauan langsung pada PLTA Sutami, Malang, Jawa Timur untuk mengetahui secara langsung turbin Francis dan melakukan pengambilan data-data turbin yang akan digunakan untuk perhitungan unjuk kerja turbin. Data-data yang didapat sebagai berikut:

1. Debit air permukaan air waduk (Q_1)
2. Debit air masuk turbin (Q_2)
3. Tekanan permukaan air waduk (p_1)
4. Tekanan pada *draft tube* (p_2)
5. Elevasi permukaan air waduk (z_1)
6. Elevasi air keluar turbin (z_2)
7. Elevasi *tailrace*
8. Diameter permukaan air waduk (D_1)
9. Diameter *outlet* turbin (D_2)
10. Putaran turbin (n)
11. Daya generator (P_l)
12. Massa jenis (ρ)
13. Percepatan gravitasi (g)

3.1.3 Perhitungan Data dan Analisa

Menghitung data-data yang didapat dari observasi dan menganalisanya. Perhitungan yang didapat:

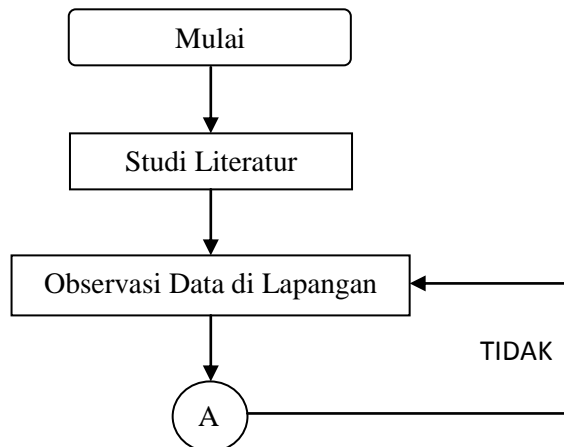
1. Head Efektif (H_{eff})
2. Daya Hidrolik (P_h)
3. Daya Turbin (P_t)
4. Efisiensi Turbin (η_t)
5. Kecepatan Spesifik (n_s)
6. Koefisien Kavitas (σ)

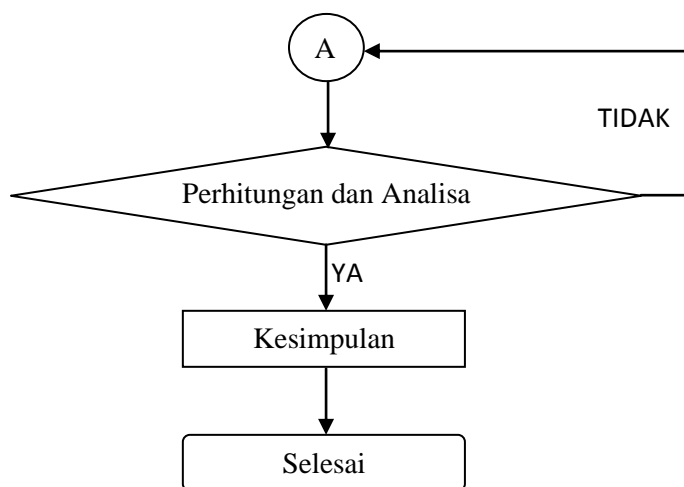
3.1.4 Kesimpulan

Mengetahui unjuk kerja turbin Francis dan hubungan antara faktor-faktor di dalamnya serta menentukan pengaruh tingkat kavitasi terhadap unjuk kerja turbin Francis.

3.2 Flowchart

Adapun langkah-langkah penulisan Tugas Akhir ini dapat dilihat pada gambar di bawah ini.





Gambar 3.1 *Flowchart*

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Data yang Diperoleh dan Contoh Perhitungan Turbin Unit 2 pada Daya Generator 20 kW

4.1.1 Head Efektif (H_{eff})

Tabel 4.1 Data Hasil Observasi di PLTA Sutami

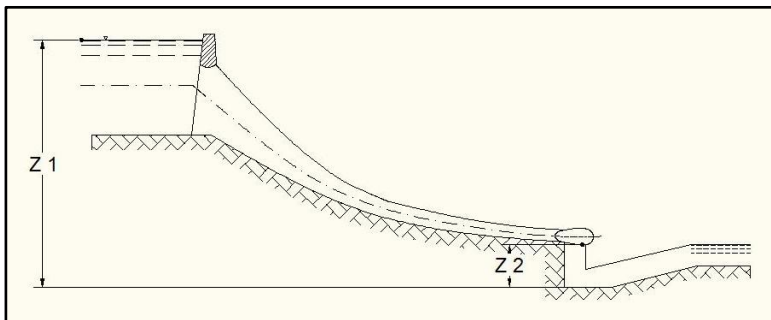
Data	Nilai	Keterangan
ρ_{air} (massa jenis air)	998,23 kg/m ³	Diasumsikan suhu air mencapai 20°C
g (percepatan gravitasi)	9,79947 m/s ²	Pada ketinggian turbin 175,931 m (turbin Francis pada <i>runner</i> bagian bawah) diasumsikan dari gambar teknik <i>penstock</i> dan turbin.
A_1 (luas permukaan air waduk)	∞ (tak hingga)	Diasumsikan
D_2 (diameter inlet <i>draft tube</i>)	3.200 mm	Diasumsikan sama dengan diameter <i>outlet</i> turbin (dari data teknik)
Q_1 (debit permukaan air waduk)	0 m ³ /s	Diasumsikan air diam
Q_2 (debit air masuk turbin)	29,33 m ³ /s	Data Pengusahaan
p_1 (tekanan permukaan air waduk)	0 N/m ²	Diasumsikan di permukaan air waduk (tekanan <i>gauge</i>)
p_2 (tekanan pada <i>draft tube</i>)	-0,04 kg/cm ²	Lembar Operasional Harian (tekanan <i>gauge</i>)

z_1 (elevasi permukaan air waduk)	271,85 m	Data Pengusahaan
z_2 (elevasi sensor tekanan <i>draft tube</i>)	175,531 m	Diasumsikan 0,4 m di bawah <i>runner</i> bagian bawah turbin

Tabel 4.2 Data Konversi Satuan

Data	Nilai
D_2 (diameter <i>inlet draft tube</i>)	3,2 m
p_2 (tekanan pada <i>draft tube</i>)	-4.000 N/m ²

Berikut adalah gambar skema elevasi z_1 dan z_2



Gambar 4.1 Skema Elevasi z_1 dan z_2

Dari D_2 diperoleh $A_2 = 0,25 \cdot \pi \cdot D_2^2 = 0,25 \cdot 3,14 \cdot 3,2^2 = 8,0384 \text{ m}^2$

Agar bisa menghitung head efektif maka diperlukan data kecepatan awal dan kecepatan akhir. Maka kecepatan tersebut diperoleh dengan menghitung data dari tabel di atas.

Contoh perhitungan kecepatan:

$$v_1 = \left(\frac{Q_1}{A_1} \right) = \left(\frac{0}{\infty} \right) = 0 \text{ m/s}$$

$$v_2 = \left(\frac{Q_2}{A_2} \right) = \left(\frac{29,33}{8,0384} \right) = 3,648736067 \text{ m/s}$$

Contoh perhitungan head efektif (persamaan 2.12):

$$H_{eff} = \left(\frac{p_1 - p_2}{\rho \cdot g} \right) + \left(\frac{v_1^2 - v_2^2}{2 \cdot g} \right) + (z_1 - z_2)$$

$$H_{eff} = \left(\frac{0 - (-4000)}{998,23 \cdot 9,79947} \right) + \left(\frac{0^2 - 3,648736067^2}{2 \cdot 9,79947} \right) + (271,85 - 175,531)$$

$$H_{eff} = 96,04862365 \text{ m}$$

4.1.2 Daya Hidrolik (P_h)

Tabel 4.3 Data untuk Perhitungan Daya Hidrolik

Data	Nilai	Keterangan
ρ_{air} (massa jenis air)	998,23 kg/m ³	Diasumsikan suhu air mencapai 20°C
g (percepatan gravitasi)	9,79947 m/s ²	Pada ketinggian turbin 175,931 m (turbin Francis pada <i>runner</i> bagian bawah) diasumsikan dari gambar teknik <i>penstock</i> dan turbin.
Q (debit air masuk turbin)	29,33 m ³ /s	Data Perusahaan
H_{eff} (head efektif)	96,04862365 m	Hasil perhitungan 4.1.1

Contoh perhitungan daya hidrolik (persamaan 2.13):

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_{eff}$$

$$P_h = 998,23.9,79947.29,33.96,04862365$$

$$P_h = 27557284,14 \text{ W}$$

$$P_h = 27557,28414 \text{ kW}$$

4.1.3 Daya Turbin (P_t)

Tabel 4.4 Data untuk Perhitungan Daya Turbin

Data	Nilai	Keterangan
η_g (efisiensi generator)	90%	Data Teknik UP Brantas
P_l (daya generator)	20.000 kW	Data Perusahaan

Contoh perhitungan daya turbin (persamaan 2.14):

$$P_t = \frac{P_l}{\eta_g}$$

$$P_t = \frac{20.000}{0,90}$$

$$P_t = 22222,22222 \text{ kW}$$

4.1.4 Efisiensi Turbin (η_t)

Tabel 4.5 Data untuk Perhitungan Efisiensi Turbin

Data	Nilai	Keterangan
P_t (daya turbin)	22222,22222 kW	Hasil perhitungan 4.1.3
P_h (daya hidrolik)	27557,28414 kW	Hasil perhitungan 4.1.2

Contoh perhitungan efisiensi turbin (persamaan 2.15):

$$\eta_t = \frac{P_t}{P_h} \times 100\%$$

$$\eta_t = \frac{22222,22222}{27557,28414} \times 100\%$$

$$\eta_t = 0,8064010265 \times 100\%$$

$$\eta_t = 80,64010265\%$$

4.1.5 Kecepatan Spesifik Turbin (n_s)

Tabel 4.6 Data untuk Perhitungan Kecepatan Spesifik

Data	Nilai	Keterangan
n (putaran nominal turbin)	250 rpm	Data teknik
P_t (daya turbin)	22222,22222 kW	Hasil perhitungan 4.1.3
H_{eff} (head efektif)	96,04862365 m	Hasil perhitungan 4.1.1

Contoh perhitungan kecepatan spesifik (persamaan 2.16):

$$n_s = \frac{n\sqrt{P}}{(H)^{5/4}}$$

$$n_s = \frac{250\sqrt{22222,22222}}{(96,04862365)^{5/4}}$$

$$n_s = 123,9423766 \text{ rpm}$$

4.1.6 Koefisien Kavitas (σ)

Tabel 4.7 Data untuk Perhitungan Koefisien Kavitas

Data	Nilai	Keterangan
H_{atm} (tekanan atmosfer)	10,10 m kolom air	Tabel hubungan antara tinggi di atas permukaan laut dan

		tekanan atmosfer (tinggi turbin dari permukaan air laut adalah 175,931 m)
H_v (tekanan uap air di sisi <i>runner</i>)	0,24 m kolom air	Tabel hubungan antara suhu air dan tekanan uap (suhu air diasumsikan mencapai 20°C)
H_s (tinggi hisap)	$H_s = \text{tinggi turbin} - \text{tinggi air pada tailrace}$ $H_s = 175,931 \text{ m} - 181,4 \text{ m}$ $H_s = -5,469 \text{ m}$	Selisih antara tinggi turbin dan tinggi air pada <i>tailrace</i>
H_{eff} (head efektif)	96,04862365 m	Hasil perhitungan 4.1.1

Contoh perhitungan koefisien kavitasi (persamaan 2.8):

$$\sigma = \frac{H_{atm} - H_v - H_s}{H}$$

$$\sigma = \frac{10,10 - 0,24 - (-5,469)}{96,04862365}$$

$$\sigma = 0,159596248$$

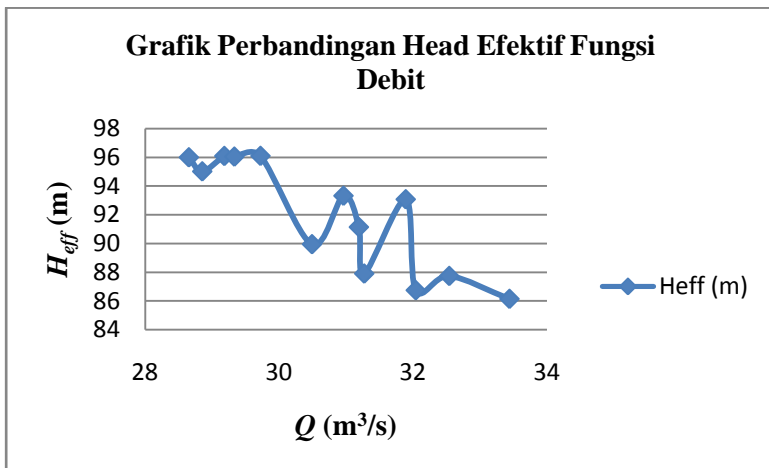
4.2 Data Hasil Perhitungan dan Analisa

4.2.1 Perbandingan Head Efektif Fungsi Debit

Tabel 4.8 Data Perbandingan Head Efektif Fungsi Debit

$Q \text{ (m}^3\text{/s)}$	$H_{eff} \text{ (m)}$
28,65	95,99975625

28,85	95,02067541
29,18	96,09555391
29,33	96,04862365
29,72	96,10043868
30,49	89,94382971
30,96	93,32102377
31,19	91,13973628
31,27	87,89579062
31,89	93,07486902
32,04	86,73729678
32,54	87,73179936
33,44	86,13490906



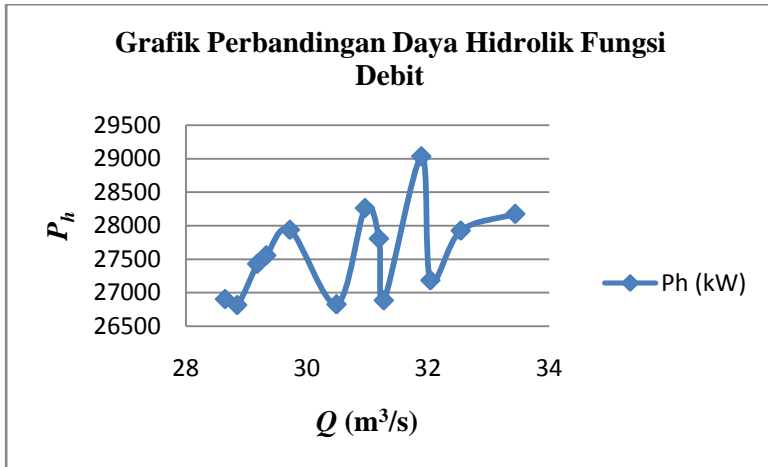
Gambar 4.2 Grafik Perbandingan Head Efektif Fungsi Debit

Dari Gambar 4.2 diketahui bahwasanya saat debit naik maka head efektif turun dan saat debit turun maka head efektif naik. Namun hal ini tidaklah mutlak berbanding terbalik antara debit dan head efektif karena tergantung pada nilai elevasi permukaan air waduk. Head efektif tertinggi ditunjukkan oleh angka 96,10043868 m dengan debit sebesar 29,72 m³/s. Sedangkan head efektif terendah ditunjukkan oleh angka 86,13490906 m dengan debit sebesar 33,44 m³/s.

4.2.2 Perbandingan Daya Hidrolik Fungsi Debit

Tabel 4.9 Data Perbandingan Daya Hidrolik Fungsi Debit

Q (m ³ /s)	P_h (kW)
28,65	26904,69
28,85	26816,19
29,18	27429,75
29,33	27557,28
29,72	27938,78
30,49	26826,38
30,96	28262,7
31,19	27807,14
31,27	26886,18
31,89	29034,89
32,04	27185,14
32,54	27925,94
33,44	28175,96



Gambar 4.3 Grafik Perbandingan Daya Hidrolik Fungsi Debit

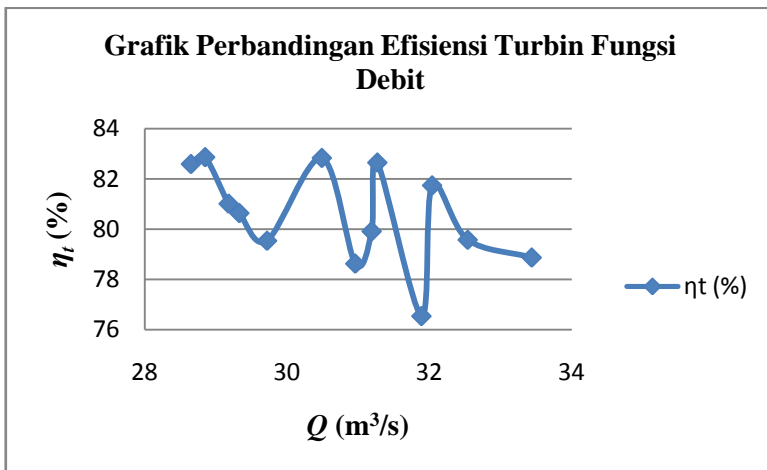
Dari Gambar 4.3 di atas diketahui bahwa ketika debit naik maka daya hidrolik naik dan ketika debit turun maka daya hidrolik turun. Namun hal ini tidaklah mutlak berbanding lurus antara debit dengan daya hidrolik karena tergantung nilai head efektifnya. Daya hidrolik terbesar ditunjukkan oleh nilai 29034,88821 kW dengan debit 31,89 m^3/s . Sedangkan daya hidrolik terkecil ditunjukkan oleh nilai 26816,19382 kW dengan debit 28,85 m^3/s .

4.2.3 Perbandingan Efisiensi Turbin Fungsi Debit

Tabel 4.10 Data Perbandingan Efisiensi Turbin Fungsi Debit

Q (m^3/s)	η_t (%)
28,65	82,59609673
28,85	82,86866649
29,18	81,01504896

29,33	80,64010265
29,72	79,53899617
30,49	82,83721341
30,96	78,6273854
31,19	79,91552162
31,27	82,65294313
31,89	76,53627614
32,04	81,74400097
32,54	79,57555852
33,44	78,86945005



Gambar 4.4 Grafik Perbandingan Efisiensi Turbin Fungsi Debit

Dari Gambar 4.4 di atas diketahui bahwa saat debit naik maka efisiensi turun dan saat debit turun maka efisiensi naik. Akan tetapi hal ini tidak mutlak berbanding terbalik karena tergantung oleh head efektifnya. Efisiensi tertinggi ditunjukkan oleh nilai 82,86866649% dengan debit 28,85 m³/s. Sedangkan

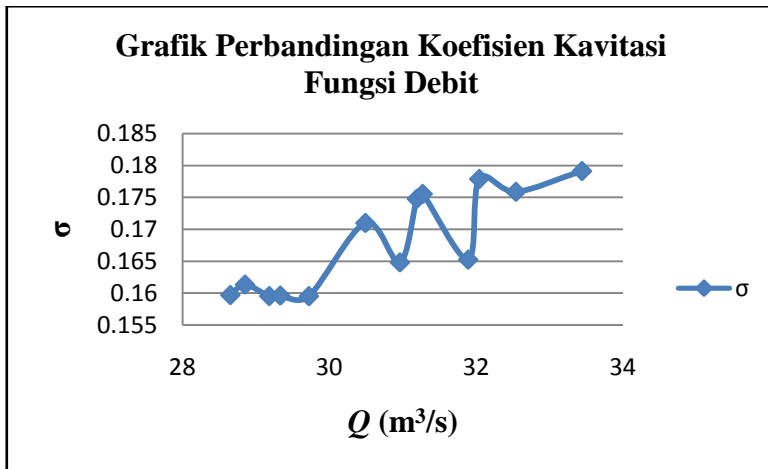
efisiensi terendah ditunjukkan oleh nilai 76,53627614% dengan debit 31,89 m³/s.

Berdasarkan grafik efisiensi versus beban dari beberapa jenis turbin (lihat Lampiran 2) maka hasil perhitungan efisiensi pada turbin Francis PLTA Sutami dengan beban 20 kW (beban 20 kW ini merupakan 57% dari beban penuh, sedangkan beban penuhnya adalah 35 kW) dalam hal ini sesuai atau dalam batas normal, yaitu berkisar pada efisiensi turbin 78%.

4.2.4 Perbandingan Koefisien Kavitas Fungsi Debit

Tabel 4.11 Data Perbandingan Koefisien Kavitas Fungsi Debit

Q (m ³ /s)	σ
28,65	0,159677489
28,85	0,161322785
29,18	0,159518306
29,33	0,159596248
29,72	0,159510198
30,49	0,170984492
30,96	0,164796735
31,19	0,174775577
31,27	0,175537416
31,89	0,165232572
32,04	0,177881956
32,54	0,175865537
33,44	0,17912598



Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Koefisien Kavitasi Fungsi Debit

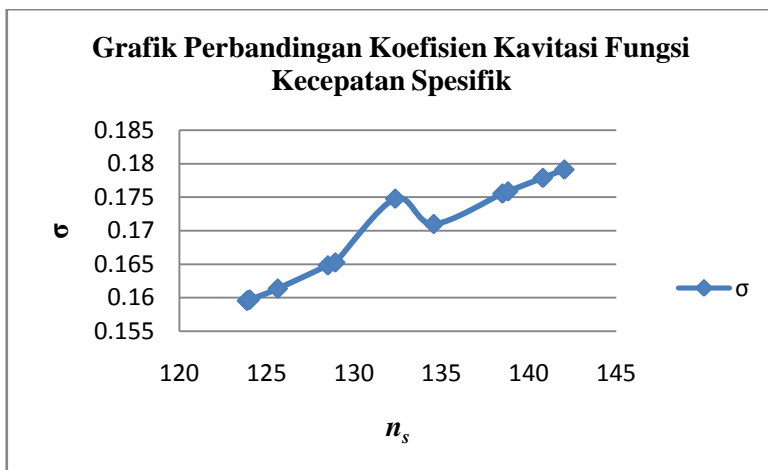
Dari Gambar 4.5 di atas diketahui bahwa saat debit naik maka koefisien kavitasi naik dan saat debit turun maka koefisien kavitasi turun. Akan tetapi hal ini tidak mutlak berbanding lurus karena tergantung oleh head efektif dan elevasi air pada *tail race*. Koefisien kavitasi terbesar ditunjukkan oleh nilai 0,17912598 dengan debit 33,44 m^3/s . Sedangkan koefisien kavitasi terkecil ditunjukkan oleh nilai 0,159510198 dengan debit 29,72 m^3/s .

Perlu diketahui bahwa koefisien kavitasi yang semakin besar menunjukkan tingkat kavitasi semakin kecil, artinya kemungkinan mengalami kavitasi semakin kecil. Dan sebaliknya koefisien kavitasi yang semakin kecil menunjukkan tingkat kavitasi semakin besar, artinya kemungkinan mengalami kavitasi semakin besar (lihat Gambar 2.16).

4.2.5 Perbandingan Koefisien Kavitasi Fungsi Kecepatan Spesifik

Tabel 4.12 Data Perbandingan Koefisien Kavitasi Fungsi Kecepatan Spesifik

n_s (rpm)	σ
123,8588488	0,159510198
123,8667189	0,159518306
123,9423766	0,159596248
124,0212456	0,159677489
125,6206715	0,161322785
128,4870576	0,164796735
128,9119594	0,165232572
132,342411	0,174775577
134,5456102	0,170984492
138,4757275	0,175537416
138,7993575	0,175865537
140,7914877	0,177881956
142,02335	0,17912598



Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Koefisien Kavitas Fungsi Kecepatan Spesifik

Dari Gambar 4.6 diketahui saat kecepatan spesifik naik maka koefisien kavitas naik dan saat kecepatan spesifik turun maka koefisien kavitas turun. Koefisien kavitas terbesar ditunjukkan oleh 0,17912598 dengan kecepatan spesifik sebesar 142,02335 rpm. Sedangkan koefisien kavitas terkecil ditunjukkan oleh 0,159510198 dengan kecepatan spesifik sebesar 123,8588488 rpm. Dalam hal ini semakin kecil koefisien kavitas menunjukkan bahwa semakin besar tingkat kavitasnya, artinya kemungkinan untuk masuk daerah bahaya kavitas itu lebih besar. Sebaliknya, semakin besar koefisien kavitas menunjukkan bahwa semakin kecil tingkat kavitasnya, artinya kemungkinan memasuki daerah bahaya kavitas menjadi lebih kecil (lihat Gambar 2.16).

Berdasarkan Gambar 2.16 dapat dilihat bahwa hasil dari grafik pada Gambar 4.6 memasuki daerah bahaya kavitas. Jadi, dalam pengoperasiannya turbin unit 2 PLTA Sutami ini mengalami kavitas. Hal ini dikarenakan turbin unit 2 PLTA Sutami bekerja dengan beban minimum, yakni 20 MW sehingga

dalam beban yang rendah kemungkinan terjadi kavitasi semakin besar. Namun, kavitasi yang terjadi tidak terlalu besar sehingga efisiensi turbin masih normal, artinya tidak menurun drastis. Bisa dikatakan demikian karena efisiensi turbin masih dalam nilai normal berdasarkan dari grafik hubungan efisiensi versus beban pada turbin Francis (lihat Lampiran 2 dan lihat keterangan Gambar 4.4).

Agar tidak terjadi kavitasi yang besar yang mana nanti bisa berakibat menurunnya efisiensi turbin secara drastis maka diperlukan pola pengoperasian yang sesuai pada batas-batas tertentu secara teoritis, yakni mengoperasikan turbin dalam kondisi:

- a. Tidak di bawah beban minimumnya (tidak boleh kurang dari 20 MW)
- b. Pengaturan debit air masuk turbin, elevasi waduk dan elevasi *tail race* (pembukaan pintu *tail race*) yang aman kavitasi (perlu diadakan analisa lebih lanjut).

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil perhitungan dan analisa pada BAB IV maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Head Efektif berbanding terbalik dengan debit air. Namun hal ini tidak mutlak berbanding terbalik karena tergantung oleh nilai elevasi permukaan air waduk. Head efektif tertinggi ditunjukkan oleh angka 96,10043868 m dengan debit sebesar 29,72 m³/s. Sedangkan head efektif terendah ditunjukkan oleh angka 86,13490906 m dengan debit sebesar 33,44 m³/s.
2. Daya hidrolik berbanding lurus dengan debit air. Akan tetapi hal ini tidak mutlak berbanding terbalik karena dipengaruhi oleh head efektifnya. Daya hidrolik terbesar ditunjukkan oleh nilai 29034,88821 kW dengan debit 31,89 m³/s. Sedangkan daya hidrolik terkecil ditunjukkan oleh nilai 26816,19382 kW dengan debit 28,85 m³/s.
3. Efisiensi turbin berbanding terbalik dengan debit air. Namun hal ini tidak mutlak berbanding terbalik karena tergantung oleh head efektifnya. Efisiensi tertinggi ditunjukkan oleh nilai 82,86866649% dengan debit 28,85 m³/s. Sedangkan efisiensi terendah ditunjukkan oleh nilai 76,53627614% dengan debit 31,89 m³/s.
4. Koefisien kavitasi berbanding lurus dengan debit air. Koefisien kavitasi terbesar ditunjukkan oleh nilai 0,17912598 dengan debit 33,44 m³/s. Sedangkan koefisien kavitasi terkecil ditunjukkan oleh nilai 0,159510198 dengan debit 29,72 m³/s.
5. Koefisien kavitasi berbanding lurus dengan kecepatan spesifik. Koefisien kavitasi terbesar ditunjukkan oleh 0,17912598 dengan kecepatan spesifik sebesar 142,02335 rpm. Sedangkan koefisien kavitasi terkecil ditunjukkan oleh 0,159510198 dengan kecepatan spesifik sebesar 123,8588488 rpm.

6. Turbin Unit 2 PLTA Sutami mengalami kavitasi berdasarkan nilai koefisien kavitasi dan kecepatan spesifik.
7. Tingkat kavitasi kecil sehingga tidak mengakibatkan efisiensi turbin turun drastis. Hal ini dilihat dari efisiensi turbin yang masih dalam batas normal.

5.2 Saran

Dalam Tugas Akhir ini masih terdapat banyak kekurangan sehingga diperlukan beberapa saran agar Tugas Akhir ini bisa lebih baik dari penelitian sebelumnya. Berikut beberapa saran:

1. Agar tidak terjadi kavitasi yang besar yang mana nanti bisa berakibat menurunnya efisiensi turbin secara drastis maka diperlukan pola pengoperasian yang sesuai pada batas-batas tertentu secara teoritis, yakni mengoperasikan turbin dalam kondisi:
 - a. Tidak di bawah beban minimumnya (tidak boleh kurang dari 20 MW)
 - b. Pengaturan debit air masuk turbin, elevasi waduk dan elevasi tail race (pembukaan pintu tail race) yang aman kavitasi (perlu diadakan analisa lebih lanjut).
2. Pahami dengan benar topik, materi dan data yang akan dijadikan Tugas Akhir.
3. Lakukan sesuai dengan metodologi agar berjalan sesuai dengan rencana.
4. Gunakan referensi yang benar-benar mendukung penelitian Tugas Akhir.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arismunandar, Wiranto. 2004. *Penggerak Mula Turbin*. Bandung: Penerbit ITB.
- [2] Borgnakke, Claus and Sonntag, Richard E. 2009. *Fundamentals of Thermodynamics Seventh Edition*. United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- [3] Dandekar, M.M. dan Sharma, K.N. 1991. *Pembangkit Listrik Tenaga Air*. Jakarta: Penerbit Universitas Indonesia.
- [4] Dietzel, Fritz. 1993. *Turbin, Pompa dan Kompresor*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- [5] Dixon, S.L. 2005. *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery Fifth Edition*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- [6] <http://najamudinmt.blogspot.co.id/2014/12/tinjauan-prestasi-mesin-pada-turbin-air.html/15/6/2017>
- [7] <http://www.freeflowhydro.co.uk/13/24/CINK/CINK.html/15/6/2017>
- [8] https://en.wikipedia.org/wiki/Francis_turbine/15/6/2017
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/Kaplan_turbine/15/6/2017
- [10] <https://www.slideshare.net/YogiSimamora/analisis-generator-pembangkit-listrik/15/6/2017>
- [11] Laporan PKL Universitas Negeri Semarang di PT PJB UP Brantas 2016
- [12] Laporan Praktikum Turbin Air Francis-Teknik Mesin Universitas Brawijaya
- [13] Pemeliharaan Turbin Air Lanjutan 1 (level 2). PT PLN (Persero) Undiklat Padang.
- [14] Pudjanarsa, Astu dan Nursuhud, Djati. 2008. *Mesin Konversi Energi*. Yogyakarta: Penerbit Andi Yogyakarta.
- [15] Sobich, E.M. 2008. Determinasi Nilai Interpolasi Densitas Air dengan Metoda Langsung dan Solusinya dengan Bantuan Matlab.

LAMPIRAN

Lampiran 1

Tabel Konversi [2]

TABLE A.1

Conversion Factors

Area (<i>A</i>)	
$1 \text{ mm}^2 = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2$	$1 \text{ ft}^2 = 144 \text{ in.}^2$
$1 \text{ cm}^2 = 1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 0.1550 \text{ in.}^2$	$1 \text{ in.}^2 = 6.4516 \text{ cm}^2 = 6.4516 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
$1 \text{ m}^2 = 10.7639 \text{ ft}^2$	$1 \text{ ft}^2 = 0.092 903 \text{ m}^2$
Conductivity (<i>k</i>)	
$1 \text{ W/m-K} = 1 \text{ J/s-m-K}$ $= 0.577 789 \text{ Btu/h-ft-}^\circ\text{R}$	$1 \text{ Btu/h-ft-R} = 1.730 735 \text{ W/m-K}$
Density (ρ)	
$1 \text{ kg/m}^3 = 0.06242797 \text{ lbm/ft}^3$	$1 \text{ lbm/ft}^3 = 16.018 46 \text{ kg/m}^3$
$1 \text{ g/cm}^3 = 1000 \text{ kg/m}^3$	
$1 \text{ g/cm}^3 = 1 \text{ kg/L}$	
Energy (<i>E</i>, <i>U</i>)	
$1 \text{ J} = 1 \text{ N-m} = 1 \text{ kg-m}^2/\text{s}^2$	
$1 \text{ J} = 0.737 562 \text{ lbf-ft}$	$1 \text{ lbf-ft} = 1.355 818 \text{ J}$
$1 \text{ cal (Int.)} = 4.18681 \text{ J}$	$= 1.28507 \times 10^{-3} \text{ Btu}$
	$1 \text{ Btu (Int.)} = 1.055 056 \text{ kJ}$
$1 \text{ erg} = 1.0 \times 10^{-7} \text{ J}$	$= 778.1693 \text{ lbf-ft}$
$1 \text{ eV} = 1.602 177 33 \times 10^{-19} \text{ J}$	
Force (<i>F</i>)	
$1 \text{ N} = 0.224809 \text{ lbf}$	$1 \text{ lbf} = 4.448 222 \text{ N}$
$1 \text{ kp} = 9.80665 \text{ N (1 kgf)}$	
Gravitation	
$g = 9.80665 \text{ m/s}^2$	$g = 32.17405 \text{ ft/s}^2$
Heat capacity (C_p, C_r, C), specific entropy (s)	
$1 \text{ kJ/kg-K} = 0.238 846 \text{ Btu/lbm-}^\circ\text{R}$	$1 \text{ Btu/lbm-}^\circ\text{R} = 4.1868 \text{ kJ/kg-K}$
Heat flux (per unit area)	
$1 \text{ W/m}^2 = 0.316 998 \text{ Btu/h-ft}^2$	$1 \text{ Btu/h-ft}^2 = 3.15459 \text{ W/m}^2$

TABLE A.1 (continued)

Conversion Factors

Heat-transfer coefficient (<i>h</i>)	
1 W/m ² ·K = 0.176 11 Btu/h·ft ² ·°R	1 Btu/h·ft ² ·°R = 5.67826 W/m ² ·K
Length (<i>L</i>)	
1 mm = 0.001 m = 0.1 cm	1 ft = 12 in.
1 cm = 0.01 m = 10 mm = 0.3970 in.	1 in. = 2.54 cm = 0.0254 m
1 m = 3.28084 ft = 39.370 in.	1 ft = 0.3048 m
1 km = 0.621 371 mi	1 mi = 1.609344 km
1 mi = 1609.3 m (US statute)	1 yd = 0.9144 m
Mass (<i>m</i>)	
1 kg = 2.204 623 lbm	1 lbm = 0.453 592 kg
1 tonne = 1000 kg	1 slug = 14.5939 kg
1 grain = 6.47989 × 10 ⁻⁵ kg	1 ton = 2000 lbm
Moment (torque, <i>T</i>)	
1 N·m = 0.737 562 lbf·ft	1 lbf·ft = 1.355 818 N·m
Momentum (<i>mV</i>)	
1 kg·m/s = 7.232 94 lbf·ft/s = 0.224809 lbf·s	1 lbf·ft/s = 0.138 256 kg·m/s
Power (<i>Q</i>, <i>W</i>)	
1 W = 1 J/s = 1 N·m/s	1 lbf·ft/s = 1.355 818 W
1 W = 0.737 562 lbf·ft/s	1 Btu/h = 4.626 24 W
1 kW = 3412.14 Btu/h	1 Btu/s = 1.055 056 kW
1 hp (metric) = 0.735 499 kW	1 hp (UK) = 0.7457 kW
	= 550 lbf·ft/s
	= 2544.43 Btu/h
1 ton of refrigeration = 3.516 85 kW	1 ton of refrigeration = 12 000 Btu/h
Pressure (<i>P</i>)	
1 Pa = 1 N/m ² = 1 kg/m·s ²	1 lbf/in. ² = 6.894 757 kPa
1 bar = 1.0 × 10 ⁵ Pa = 100 kPa	
1 atm = 101.325 kPa	1 atm = 14.695 94 lbf/in. ²
= 1.01325 bar	= 29.921 in. Hg [32°F]
= 760 mm Hg [0°C]	= 33.899 5 ft H ₂ O [4°C]
= 10.332 56 m H ₂ O [4°C]	
1 torr = 1 mm Hg [0°C]	
1 mm Hg [0°C] = 0.133 322 kPa	1 in. Hg [0°C] = 0.49115 lbf/in. ²
1 m H ₂ O [4°C] = 9.806 38 kPa	1 in. H ₂ O [4°C] = 0.036126 lbf/in. ²
Specific energy (<i>e</i>, <i>u</i>)	
1 kJ/kg = 0.42992 Btu/lbm	1 Btu/lbm = 2.326 kJ/kg
= 334.55 lbf·ft/lbm	1 lbf·ft/lbm = 2.98907 × 10 ⁻³ kJ/kg
	= 1.28507 × 10 ⁻³ Btu/lbm

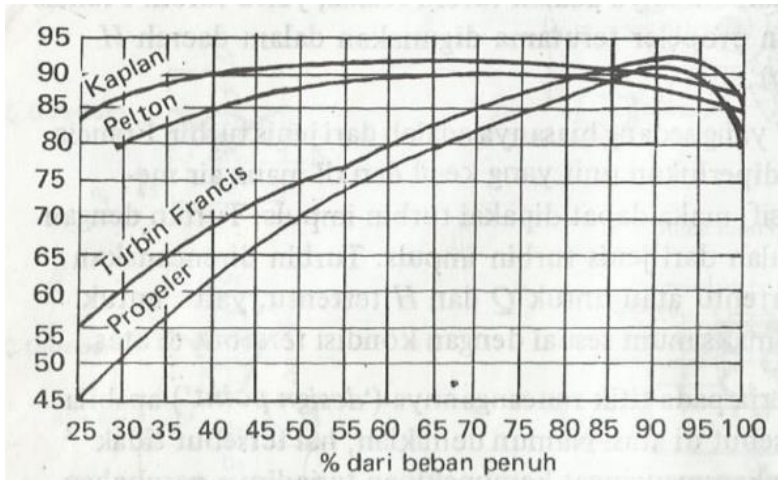
TABLE A.1 (continued)

Conversion Factors

Specific kinetic energy ($\frac{1}{2} V^2$)	
1 m ² /s ² = 0.001 kJ/kg	1 ft ² /s ² = 3.9941 × 10 ⁻⁵ Btu/lbm
1 kJ/kg = 1000 m ² /s ²	1 Btu/lbm = 25037 ft ² /s ²
Specific potential energy (Zg)	
1 m·g _{sat} = 9.80665 × 10 ⁻³ kJ/kg	1 ft·g _{sat} = 1.0 lbf·ft/lbm
= 4.21607 × 10 ⁻³ Btu/lbm	= 0.001285 Btu/lbm
	= 0.002989 kJ/kg
Specific volume (v)	
1 cm ³ /g = 0.001 m ³ /kg	
1 cm ³ /g = 1 L/kg	
1 m ³ /kg = 16.01846 ft ³ /lbm	1 ft ³ /lbm = 0.062 428 m ³ /kg
Temperature (T)	
1 K = 1°C = 1.8 R = 1.8 F	1 R = (5/9) K
TC = TK - 273.15	TF = TR - 459.67
= (TF - 32)/1.8	= 1.8 TC + 32
TK = TR/1.8	TR = 1.8 TK
Universal Gas Constant	
$\bar{R} = N_A k = 8.31451$ kJ/kmol·K	$\bar{R} = 1.98589$ Btu/lbmol·R
= 1.98589 kcal/kmol·K	= 1545.36 lbf·ft/lbmol·R
= 82.0578 atm·L/kmol·K	= 0.73024 atm·ft ³ /lbmol·R
	= 10.7317 (lbf/in. ²)·ft ³ /lbmol·R
Velocity (V)	
1 m/s = 3.6 km/h	1 ft/s = 0.681818 mi/h
= 3.28084 ft/s	= 0.3048 m/s
= 2.23694 mi/h	= 1.09728 km/h
1 km/h = 0.27778 m/s	1 mi/h = 1.46667 ft/s
= 0.91134 ft/s	= 0.44704 m/s
= 0.62137 mi/h	= 1.609344 km/h
Volume (V)	
1 m ³ = 35.3147 ft ³	1 ft ³ = 2.831 685 × 10 ⁻² m ³
1 L = 1 dm ³ = 0.001 m ³	1 in. ³ = 1.6387 × 10 ⁻⁵ m ³
1 Gal (US) = 3.785 412 L	1 Gal (UK) = 4.546 090 L
= 3.785 412 × 10 ⁻³ m ³	1 Gal (US) = 231.00 in. ³

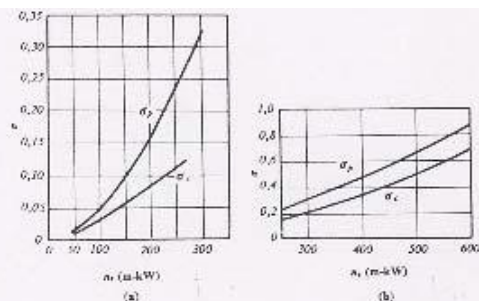
Lampiran 2

Grafik Efisiensi versus Beban dari Beberapa Jenis Turbin [1]



Lampiran 3

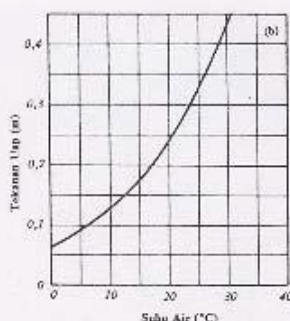
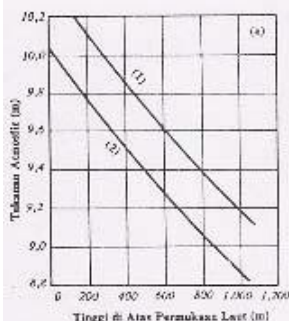
Hubungan antara kecepatan spesifik (n_s) dan σ [13]



Gbr. 41 Hubungan antara σ dan n_s untuk.

(a) Turbin Francis

(b) Turbin Kaplan



Gbr. 42(a)
Hubungan antara
Tinggi di atas Per-
mukaan Laut dan
Tekanan Atmosfir.

Gbr. 42(b)
Hubungan antara
Suhu Air dan Tek-
anan Up.

Tinggi (m)		0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1,000
Tekanan Atmosfir	(1)	10,33	10,21	10,10	9,95	9,85	9,72	9,62	9,50	9,39	9,28	9,17
(m Kolom Air)	(2)	10,01	9,89	9,78	9,63	9,53	9,40	9,30	9,18	9,07	8,96	8,85

(1) Tekanan atmosfer standar pada 0°C

(2) Nilai yang harus 0,32m terhadap tekanan uap dengan suhu air 25°C

Suhu Air (°C)	0	5	10	15	20	25	30	35
Tekanan Uap (m Kolom Air)	0,06	0,09	0,13	0,17	0,24	0,32	0,43	0,57

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Moh. Zaenal Arifin, lahir di Blitar pada tanggal 21 Juli 1995, merupakan anak pertama dari dua bersaudara pasangan Roso Wiyono dan Sun Rofi'ah. Penulis telah menempuh pendidikan formal, yaitu MI Miftahul Ulum Pucungsari Lor (2002-2005), SDN Slorok 01 (2005-2008), SMPN 1 Garum (2008-2011), SMKN 1 Blitar Jurusan Teknik Kendaraan Ringan (2011-2014). Pada tahun 2014 penulis diterima di Program Studi D3 Teknik Mesin, Departemen Teknik Mesin Industri, Fakultas Vokasi-Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya dan terdaftar sebagai mahasiswa dengan NRP 2114030087 dengan bidang studi Konversi Energi.

Selama di bangku kuliah penulis aktif mengikuti organisasi dan kegiatan di bidang non akademik baik intra kampus maupun luar kampus, yaitu Staf Departemen Keilmuan LDK JMMI ITS (2015-2016), Staf BSO LDJ Jundullah HMDM FTI-ITS (2015-2016), Staf Tim Mobil Basudewo Etanol D3 Teknik Mesin ITS (2015-2016), Anggota Divisi Engine Tim Mobil Basudewo Etanol D3 Teknik Mesin ITS (2016-2017), Staf Divisi Pengembangan Diri Mahad Thaybah Surabaya (2015-2016) dan Kepala Divisi Pendidikan Mahad Thaybah Surabaya (2016-2017).

Selain itu, penulis aktif mengikuti pelatihan keprofesian dan pengembangan diri. Pelatihan intra kampus yang pernah diikuti penulis, yaitu PKTI HMDM FTI-ITS 2014, LKMM Pra-TD FTI-ITS 2014, Program Studi Islam 1 JMMI-ITS 2014, Pesantren Kilat HMDM FTI-ITS 2014, LKMM TD HMDM FTI-ITS 2015, PJTD HMDM FTI-ITS 2015, KDDO LBMM FTI-ITS 2016 dan Workshop Autodesk Inventor DTMI FV-ITS 2017.